

3^η ενότητα:
**ΑΠΛΕΣ ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ
ΜΕ MOSFET**

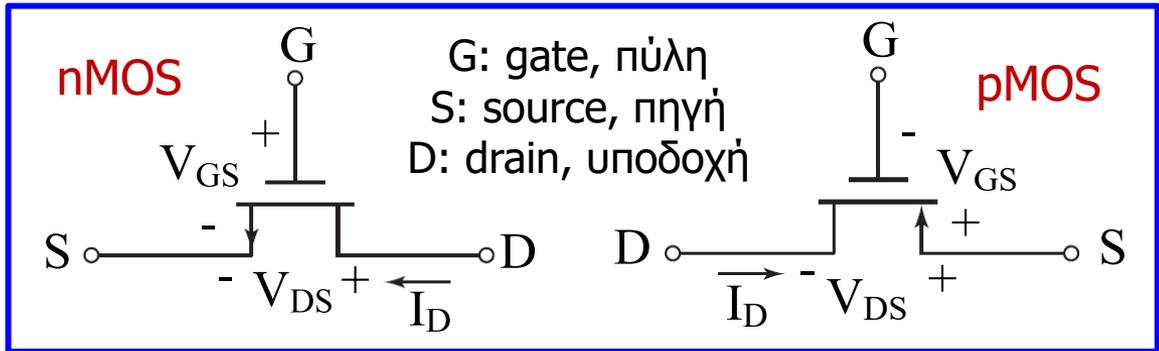


Περιεχόμενα 3ης ενότητας

- Ενισχυτική λειτουργία του MOSFET.
- Μελέτη απλών βαθμίδων ενισχυτών με MOSFET στο συνεχές (πόλωση).
- Μελέτη απλών βαθμίδων ενισχυτών με MOSFET στο εναλλασσόμενο.
- Εισαγωγή στην απόκριση συχνότητας ενισχυτών.
- Συμπεράσματα και ασκήσεις.

Ενισχυτική λειτουργία του MOSFET

- Το τρανζίστορ MOSFET λειτουργεί ως **ενισχυτής** όταν πολωθεί (δηλαδή, όταν λειτουργεί) στην **περιοχή κόρου**.



- **Περιοχή κόρου ιδανικού nMOS:**

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2, \quad V_{GS} > V_T, \quad V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$$

$\beta = K_p (W / L)$ (παράγοντας κέρδους ή απολαβή),
 K_p : παράμετρος διαγωγιμότητας, W : πλάτος καναλιού, L : μήκος καναλιού, V_T : τάση κατωφλίου

nMOS: $V_{GS}, V_{DS}, V_T, I_D > 0$

pMOS: $V_{GS}, V_{DS}, V_T, I_D < 0$

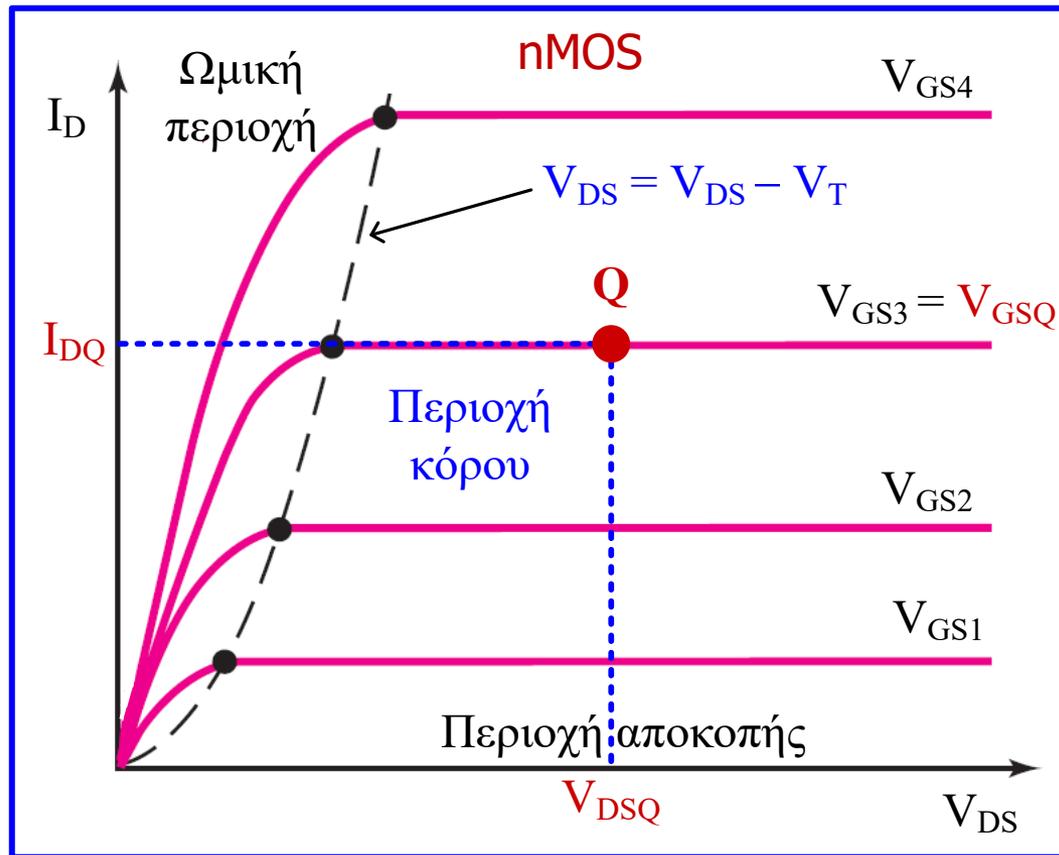
Η φορά των ανισοτήτων αντιστρέφεται για pMOS

$$I_G = 0, \quad \forall V_{GS}, V_{DS}$$

- Όταν $V_{GS} \leq V_T$ το MOSFET είναι σε **αποκοπή** και όταν $V_{GS} > V_T, V_{DS} < V_{GS} - V_T$ λειτουργεί στην **ωμική περιοχή**.
- Στα MOSFET υπάρχει και τρίτος **ακροδέκτης B (bulk, υπόστρωμα)**, ο οποίος παραλείπεται, επειδή στις περισσότερες εφαρμογές συνδέεται στην πηγή (S).

Ενισχυτική λειτουργία του MOSFET

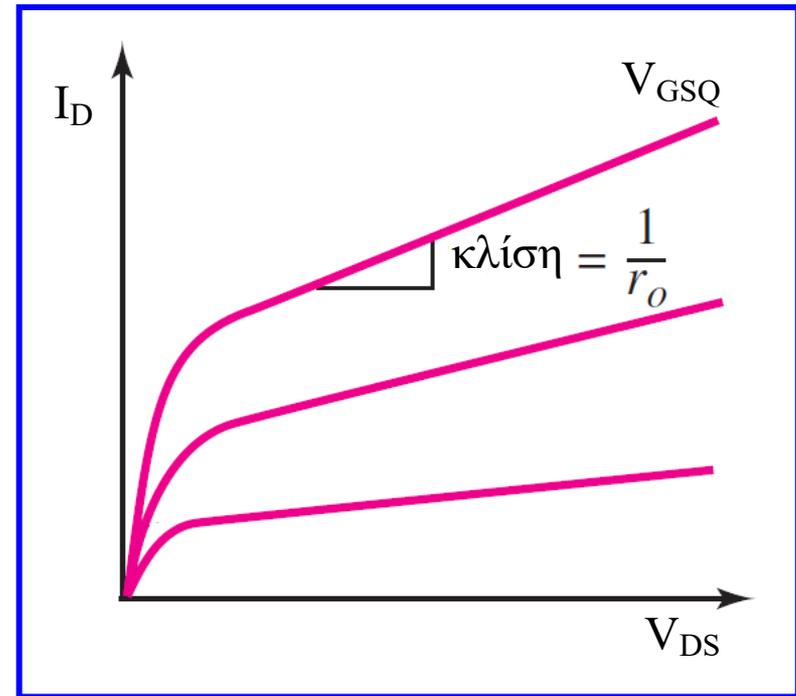
Το ζεύγος τιμών (V_{DS} , I_D) που προκύπτει με αυτή την πόλωση, καθορίζει στις χαρακτηριστικές εξόδου του MOSFET ένα σημείο Q που αναφέρεται ως **σημείο λειτουργίας** ή **σημείο ηρεμίας**.



Οι χαρακτηριστικές εξόδου του pMOS σχεδιάζονται στο 3^ο τεταρτημόριο του συστήματος αξόνων της V_{DS} και του I_D , αφού $V_{DS} < 0$ και $I_D < 0$.

Ενισχυτική λειτουργία του MOSFET

- Όταν πρόκειται για ιδανικό MOSFET, το ρεύμα I_D στην περιοχή κόρου είναι ανεξάρτητο από την τάση V_{DS} .
- Ωστόσο, στο μη ιδανικό MOSFET η κλίση των χαρακτηριστικών εξόδου στην περιοχή κόρου δεν είναι μηδενική.
- Αυτό οφείλεται στην πεπερασμένη αντίσταση εξόδου (r_o) που παρουσιάζει το τρανζίστορ, λόγω της επίδρασης του φαινομένου διαμόρφωσης (μείωσης) του μήκους καναλιού του τρανζίστορ.
- Η επίδραση του φαινομένου αυτού, λαμβάνεται υπόψη εάν πολλαπλασιάσουμε το ρεύμα I_D στην περιοχή κόρου με τον όρο $(1 + \lambda \cdot V_{DS})$, όπου λ είναι ο συντελεστής διαμόρφωσης μήκους καναλιού.



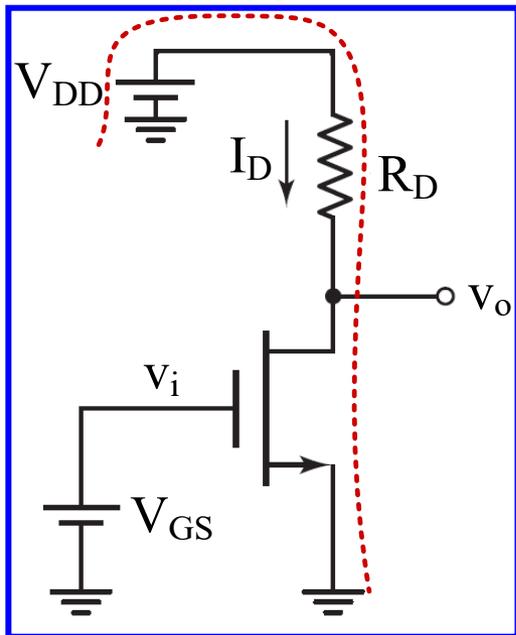
- Μια προσέγγιση της αντίστασης εξόδου του MOSFET, στο σημείο λειτουργίας του, είναι:

$$r_o \cong \frac{1}{\lambda I_D}$$

$$\lambda = 0 \Rightarrow r_o = \infty$$

Πόλωση με σταθερή τάση πύλης-πηγής

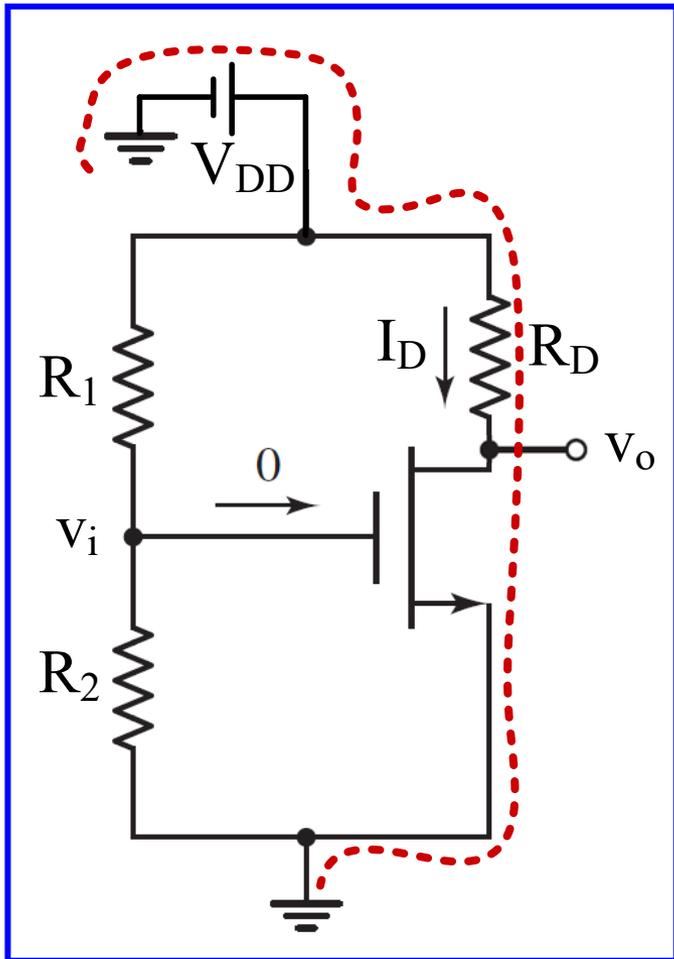
- Η ανάλυση ενός ενισχυτή για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών παραμέτρων του και του σημείου λειτουργίας, βασίζεται στους κανόνες του Kirchhoff και στη σχέση που δίνει το ρεύμα υποδοχής του MOSFET στην περιοχή κόρου.
- Υπάρχουν διάφορες τοπολογίες κυκλωμάτων κατάλληλες για την πόλωση του MOSFET στην περιοχή κόρου.
- Το παρακάτω κύκλωμα χρησιμοποιεί **σταθερή τάση** V_{GS} και περιλαμβάνει μία πηγή συνεχούς τάσης V_{DD} και μια αντίσταση R_D .



$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2$$
$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

- Απλός προσδιορισμός του $Q(V_{DS}, I_D)$.
- Μειονέκτημα του κυκλώματος είναι το ότι η πηγή εναλλασσόμενου σήματος (v_i) συνδέεται μεταξύ της πηγής σταθερής τάσης V_{GS} και της πύλης του τρανζίστορ (χωρίς πυκνωτή σύζευξης) και έτσι επηρεάζει το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ.

Πόλωση μέσω διαιρέτη τάσης



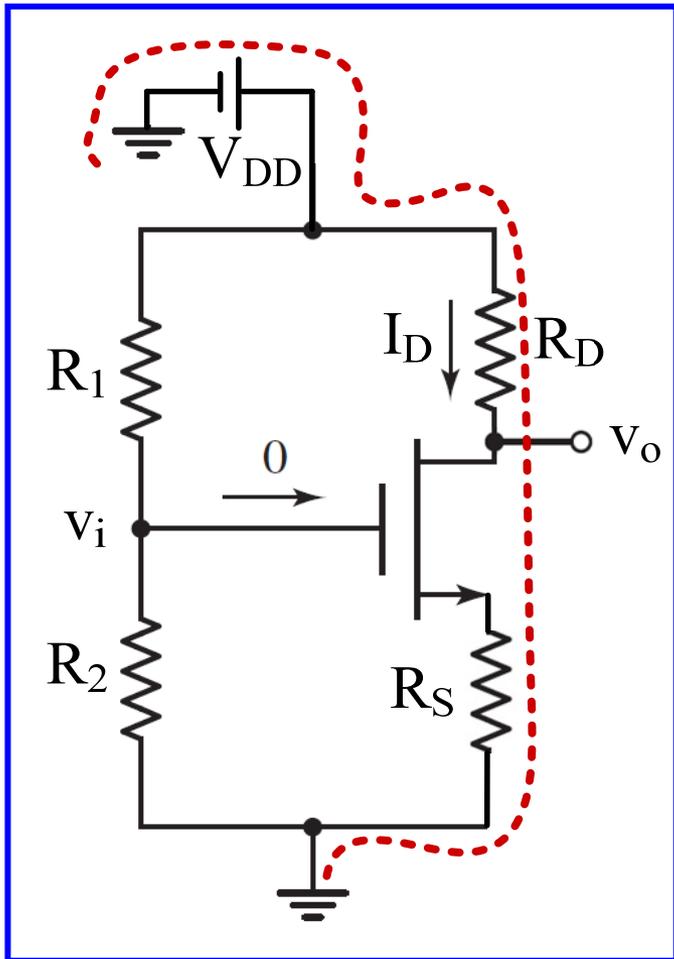
Για την πόλωση του MOSFET χρησιμοποιείται σταθερή τάση V_{GS} , η οποία παράγεται από την τάση τροφοδοσίας (V_{DD}) μέσω διαιρέτη τάσης.

$$V_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD}$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2$$

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

Πόλωση μέσω διαιρέτη τάσης με αντίσταση πηγής



$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} \quad V_{GS} = V_G - I_D R_S$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \quad \text{εξίσωση β' βαθμού}$$

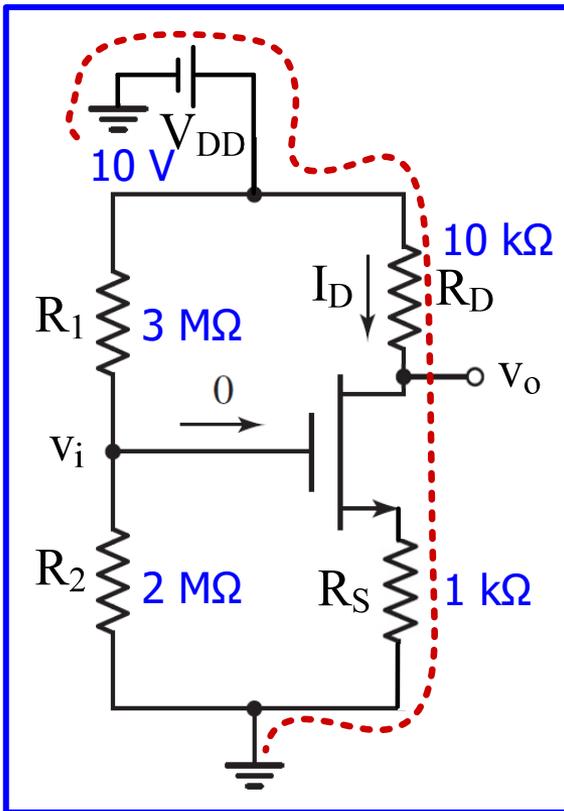
$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} + I_D R_S = 0$$

$$\Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D - I_D R_S$$

Το πλεονέκτημα του κυκλώματος αυτού είναι ότι εάν αυξηθεί η απολαβή (β) του τρανζίστορ (λόγω αύξησης θερμοκρασίας ή αυξημένου πλάτους του τρανζίστορ σε σχέση με το ονομαστικό, λόγω αστοχίας κατασκευής), το ρεύμα υποδοχής (I_D) τείνει να αυξηθεί, αλλά η παράλληλη μείωση της τάσης V_{GS} , περιορίζει αυτή την αύξησή του.

Παράδειγμα 1^ο: πόλωση μέσω διαιρέτη τάσης

Για τον ενισχυτή του σχήματος να προσδιοριστεί το σημείο λειτουργίας και ο λόγος διαστάσεων (W / L) καναλιού του τρανζίστορ nMOS, όταν το ρεύμα ηρεμίας (I_D) είναι 0,5 mA. Δίνονται: $V_T = 0,75$ V, $K_p = 50$ $\mu\text{A}/\text{V}^2$.



$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} + I_D R_3 = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_3) = 4.5 \text{ V}$$

Σημείο λειτουργίας: $Q(V_{DS}, I_D) = (4.5 \text{ V}, 0.5 \text{ mA})$

$$V_{GS} = V_G - V_S = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} - I_D R_3 = 3.5 \text{ V}$$

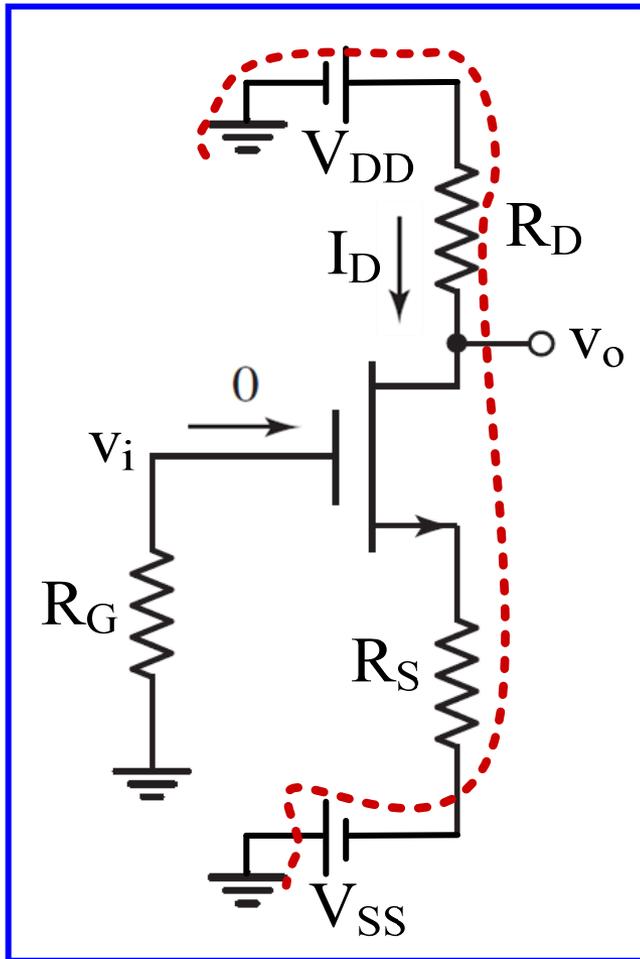
$$V_{DS} = 4.5 \text{ V} > V_{GS} - V_T = 3.5 \text{ V} - 0.75 \text{ V} = 2.75 \text{ V}$$

\Rightarrow MOSFET πολωμένο στην περιοχή κόρου:

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow \beta = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_T)^2} \Rightarrow \beta = 0.13 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$\beta = K_p \frac{W}{L} \Rightarrow \frac{W}{L} = \frac{\beta}{K_p} \Rightarrow \frac{W}{L} = 2.64$$

Πόλωση με συμμετρικές πηγές τάσης



$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - (I_D R_S - V_{SS})$$

$$\Rightarrow V_{GS} = V_{SS} - I_D R_S$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \text{ εξίσωση } \beta' \text{ βαθμού}$$

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} + I_D R_S - V_{SS} = 0$$

$$\Rightarrow V_{DS} = V_{DD} + V_{SS} - I_D R_D - I_D R_S$$

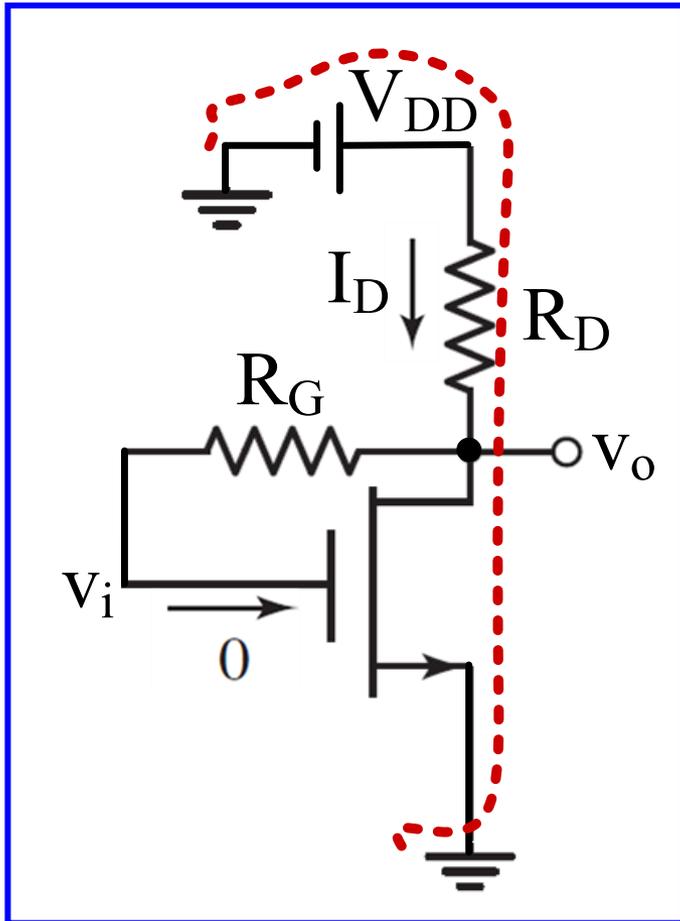
Η αντίσταση R_G δεν διαρρέεται από ρεύμα και λειτουργεί ως γείωση της πύλης του MOSFET.

Έτσι, δημιουργεί μεγάλη αντίσταση εισόδου στην πηγή σήματος (v_i), η οποία θα συνδεθεί στον ενισχυτή μέσω πυκνωτή σύζευξης.

Όπως και στο προηγούμενο κύκλωμα πόλωσης, η αντίσταση πηγής (R_S) βοηθά στην διατήρηση σταθερού ρεύματος υποδοχής (I_D).

Πόλωση με αντίσταση μεταξύ πύλης και υποδοχής

(ή πόλωση από την υποδοχή)



$$V_{GS} = V_G - V_S = V_D - 0 = V_D$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = V_D - 0 = V_D$$

$$V_{GS} = V_{DS}$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow I_D = \beta/2 (V_{DS} - V_T)^2$$

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

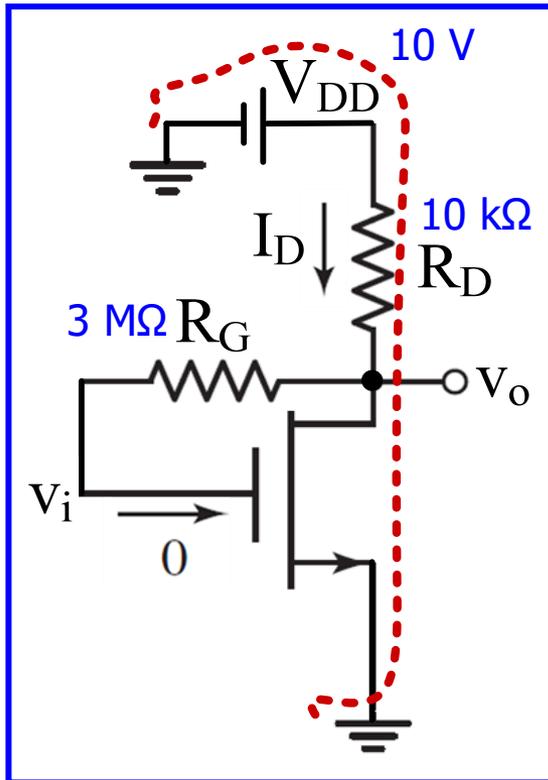
Επιλέγεται μεγάλη τιμή για την αντίσταση R_G (μερικά ΜΩ). Η αντίσταση R_G εξισώνει την τάση πύλης (V_G) με την τάση υποδοχής (V_D), αφού δεν διαρρέεται από ρεύμα.

Ο προσδιορισμός του $Q(V_{DS}, I_D)$ προϋποθέτει τη **λύση του συστήματος δύο εξισώσεων** (η 1η εξίσωση είναι β' βαθμού).

Πιθανή αύξηση του ρεύματος υποδοχής (I_D) αντισταθμίζεται από την προκαλούμενη μείωση της τάσης V_{GS} .

Παράδειγμα 2^ο: πόλωση με αντίσταση πύλης-υποδοχής

Για τον ενισχυτή κοινής πηγής του σχήματος θα προσδιορίσουμε το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ nMOS. Δίνονται: $V_T = 1 \text{ V}$, $\beta = 0,3 \text{ mA/V}^2$.



$$V_{GS} = V_G - V_S = V_D - 0 = V_D \Rightarrow V_{GS} = V_{DS}$$
$$V_{DS} = V_D - V_S = V_D - 0 = V_D$$

Αφού $V_{GS} = V_{DS} \Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_T \Rightarrow$ περιοχή κόρου

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow I_D = \beta/2 (V_{DS} - V_T)^2$$

$$\Rightarrow I_D = \beta/2 (V_{DD} - I_D R_D - V_T)^2 \Rightarrow$$

$$R_D^2 I_D^2 - 2[(V_{DD} - V_T)R_D + 1/\beta]I_D + (V_{DD} - V_T)^2 = 0$$

$$100I_D^2 - 186,66I_D + 90 = 0$$

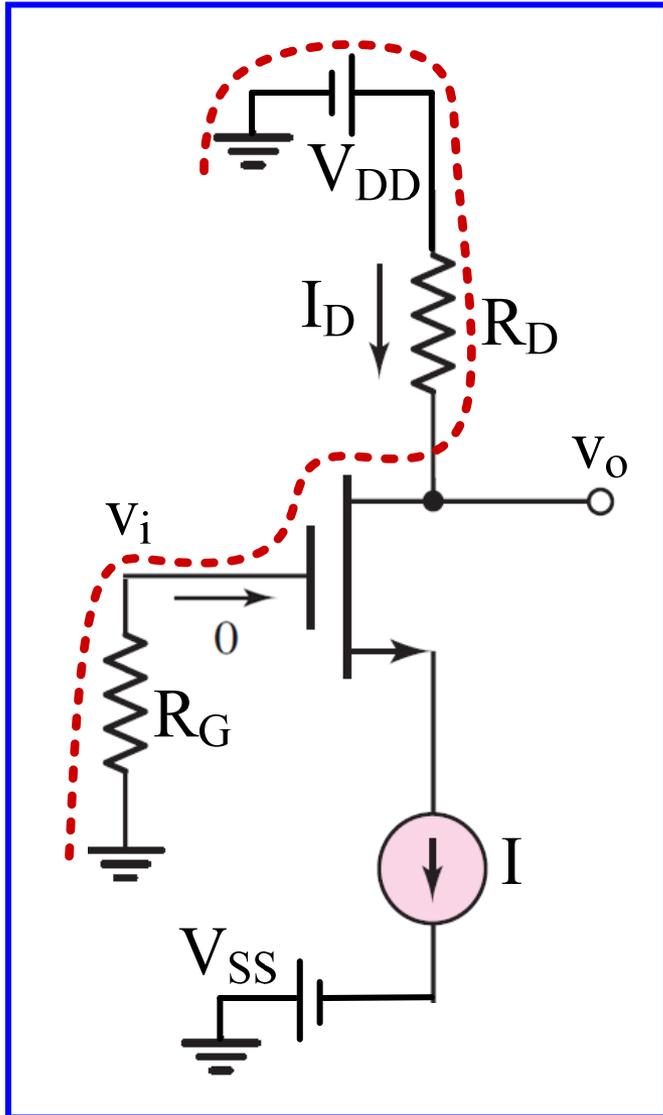
Λύσεις εξίσωσης β' βαθμού: $I_D = 0,68 \text{ mA}$, $1,18 \text{ mA}$.

$$I_D = 0,68 \text{ mA}: V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = (10 - 0,68 \cdot 10) \text{ V} = 3,2 \text{ V}$$

$$I_D = 1,18 \text{ mA}: V_{GS} < 0 \text{ και θα έπρεπε } I_D = 0.$$

Σημείο λειτουργίας: $Q(V_{DS}, I_D) = (3,2 \text{ V}, 0,68 \text{ mA})$.

Πόλωση με πηγή σταθερού ρεύματος



$$I = I_D \Rightarrow I = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS} = \sqrt{\frac{2I}{\beta}} + V_T$$

$$V_{DG} + V_{GS} + V_{SD} = 0 \Rightarrow V_{DG} = V_{DS} - V_{GS}$$

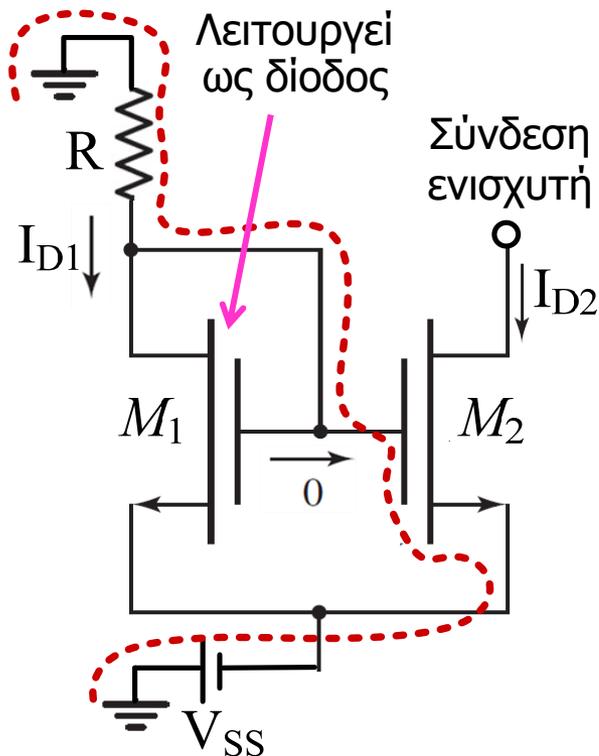
$$-V_{DD} + V_{DG} + I_D R_D = 0$$

$$\Rightarrow -V_{DD} + V_{DS} - V_{GS} + I R_D = 0$$

$$\Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I R_D + \sqrt{\frac{2I}{\beta}} + V_T$$

Πλεονέκτημα: η πηγή σταθερού ρεύματος μπορεί να υλοποιηθεί με MOSFETs και να συνδυαστεί με αντικατάσταση των αντιστάσεων του ενισχυτή από MOSFETs, έτσι ώστε ο ενισχυτής να υλοποιείται εύκολα και οικονομικά ως ολοκληρωμένο κύκλωμα.

Πηγή σταθερού ρεύματος (καθρέφτης ρεύματος)



Η λύση της εξίσωσης β' βαθμού για την οποία το M_1 λειτουργεί στον κόρο, είναι το **ρεύμα της πηγής ρεύματος που πολώνει τον ενισχυτή στον οποίο συνδέεται.**

M_1 και M_2 όμοια $\Rightarrow \beta_1 = \beta_2 = \beta, V_{T1} = V_{T2} = V_T$
 Το M_1 λειτουργεί μονίμως στην περιοχή κόρου, αφού
 $V_G = V_D \Rightarrow V_{GS} = V_{DS} \Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_T$
 $V_{GS1} = V_{GS2} = V_{GS} \Rightarrow I_{D1} = I_{D2} = I_D$, αφού
 $I_{D1} = \beta/2 (V_{GS1} - V_T)^2$ και $I_{D2} = \beta/2 (V_{GS2} - V_T)^2$,
 όταν και το M_2 διατηρείται στην περιοχή κόρου.
**Άρα, το M_1 επιβάλλει το ρεύμα υποδοχής του στο M_2
 \Rightarrow καθρέφτης ρεύματος**

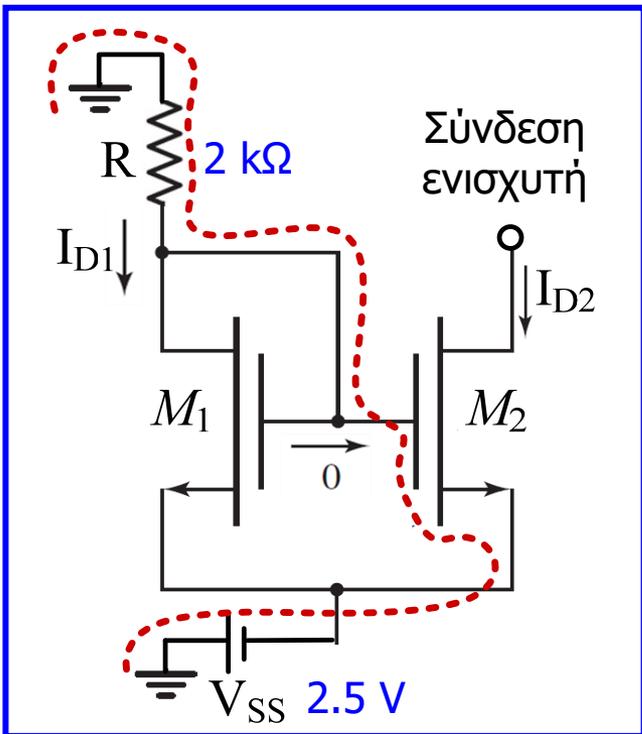
$$I_{D1}R + V_{GS2} - V_{SS} = 0 \Rightarrow V_{GS} = V_{SS} - I_D R$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow I_D = \beta/2 (V_{SS} - I_D R)^2 \Rightarrow$$

$$R^2 I_D^2 - 2(RV_{SS} + 1/\beta)I_D + V_{SS}^2 = 0$$

Παράδειγμα 3^ο: καθρέπτης ρεύματος

Για τον παρακάτω καθρέπτη ρεύματος, θα υπολογίσουμε το ρεύμα πόλωσης που παρέχεται στην σύνδεση του ενισχυτή. Δίνονται: $V_{T1} = V_{T2} = 0,4 \text{ V}$, $\beta_1 = \beta_2 = 0,6 \text{ mA/V}^2$.



$$\beta_1 = \beta_2 = \beta, V_{T1} = V_{T2} = V_T$$

Το M_1 λειτουργεί μονίμως στην περιοχή κόρου, αφού

$$V_G = V_D \Rightarrow V_{GS} = V_{DS} \Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

$$V_{GS1} = V_{GS2} = V_{GS} \Rightarrow I_{D1} = I_{D2} = I_D, \text{ αφού}$$

$$I_{D1} = \beta/2 (V_{GS1} - V_T)^2 \text{ και } I_{D2} = \beta/2 (V_{GS2} - V_T)^2,$$

όταν και το M_2 διατηρείται στην περιοχή κόρου.

$$I_{D1}R + V_{GS2} - V_{SS} = 0 \Rightarrow V_{GS} = V_{SS} - I_D R$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow I_D = \beta/2 (V_{SS} - I_D R)^2 \Rightarrow$$

$$R^2 I_D^2 - 2(RV_{SS} + 1/\beta)I_D + V_{SS}^2 = 0 \Rightarrow$$

$$4I_D^2 - 13,32I_D + 6,25 = 0$$

Λύσεις εξίσωσης β' βαθμού: $I_D = 0,56 \text{ mA}, 2,76 \text{ mA}$.

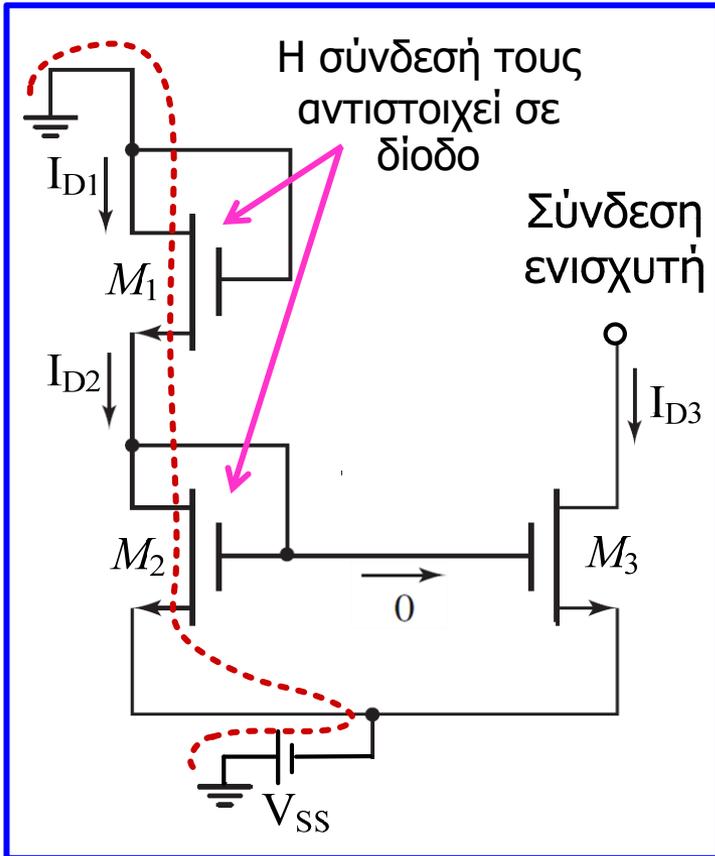
Ρεύμα πόλωσης ενισχυτή = **0,56 mA**, αφού για

$I_D = 2,76 \text{ mA}$, $V_{GS} < 0$ και θα έπρεπε $I_D = 0$

Ενισχυτές MOSFET σε ολοκληρωμένα κυκλώματα

- Οι βασικές ιδιότητες των MOSFET και των διπολικών τρανζίστορ σε ότι αφορά την σχεδίαση ενισχυτών είναι παρόμοιες.
- Για ενισχυτές που αναπτύσσονται με **διακριτά στοιχεία σε τυπωμένα κυκλώματα (PCB)**, τα **διπολικά τρανζίστορ** αποτελούν την κύρια επιλογή, αφού είναι πιο εύκολο να κατασκευαστούν ως διακριτά στοιχεία και διατίθενται σε ποικιλία στο εμπόριο.
- Ωστόσο, η χρήση των **MOSFET** έχει επικρατήσει ιδιαίτερα στη σχεδίαση ενισχυτών που υλοποιούνται σε **ολοκληρωμένα κυκλώματα (integrated circuits, ICs)**, δηλαδή κυκλωμάτων που αναπτύσσονται πάνω σε μία ψηφίδα (die, chip) ημιαγωγίμου υλικού (πυριτίου).
- Αυτό οφείλεται στο ότι τα **MOSFET** απαιτούν **μικρότερη επιφάνεια πυριτίου**, είναι πιο **εύκολο να κατασκευαστούν σε IC** και **καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια**.
- Έχουν αναπτυχθεί τεχνικές σχεδίασης με τη χρήση των οποίων τα αναλογικά (αλλά και τα ψηφιακά) κυκλώματα υλοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά με MOSFET και πολύ μικρό πλήθος αντιστάσεων (οι οποίες απαιτούν μεγαλύτερη επιφάνεια στο ολοκληρωμένο κύκλωμα).
- Όσον αφορά τους **ενισχυτές**, εκτός από την **χρήση καθρεφτών ρεύματος με MOSFET** για την πόλωση των τρανζίστορ, αρκετά συχνά οι σχεδιαστές **αντικαθιστούν και τις αντιστάσεις των ενισχυτών με MOSFET**.

Πηγή σταθερού ρεύματος μόνο με MOSFET



M_1, M_2, M_3 όμοια

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta$$

$$V_{T1} = V_{T2} = V_{T3} = V_T$$

Τα M_1, M_2 λειτουργούν στην περιοχή κόρου, αφού

$$V_G = V_D \Rightarrow V_{GS} = V_{DS} \Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

$$I_{D1} = I_{D2} \Rightarrow \beta/2 (V_{GS1} - V_T)^2 = \beta/2 (V_{GS2} - V_T)^2$$

$$\Rightarrow V_{GS1} - V_T = V_{GS2} - V_T \Rightarrow V_{GS1} = V_{GS2}$$

$$V_{DS1} + V_{DS2} - V_{SS} = 0 \Rightarrow V_{GS1} + V_{GS2} - V_{SS} = 0$$

$$\Rightarrow 2V_{GS2} - V_{SS} = 0 \Rightarrow V_{GS2} = V_{SS}/2$$

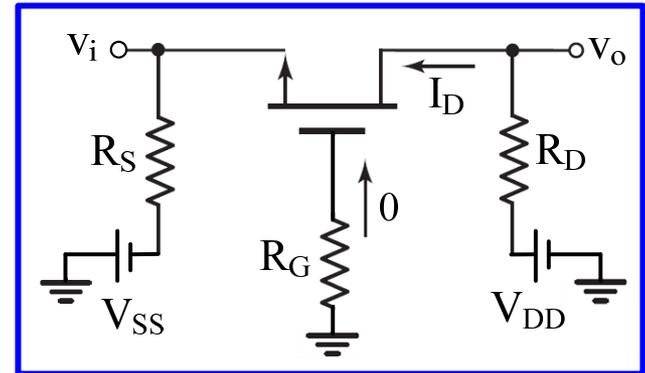
$$V_{GS3} = V_{GS2} \Rightarrow V_{GS3} = V_{SS}/2$$

$$I_{D3} = \beta/2 (V_{GS3} - V_T)^2 \Rightarrow$$

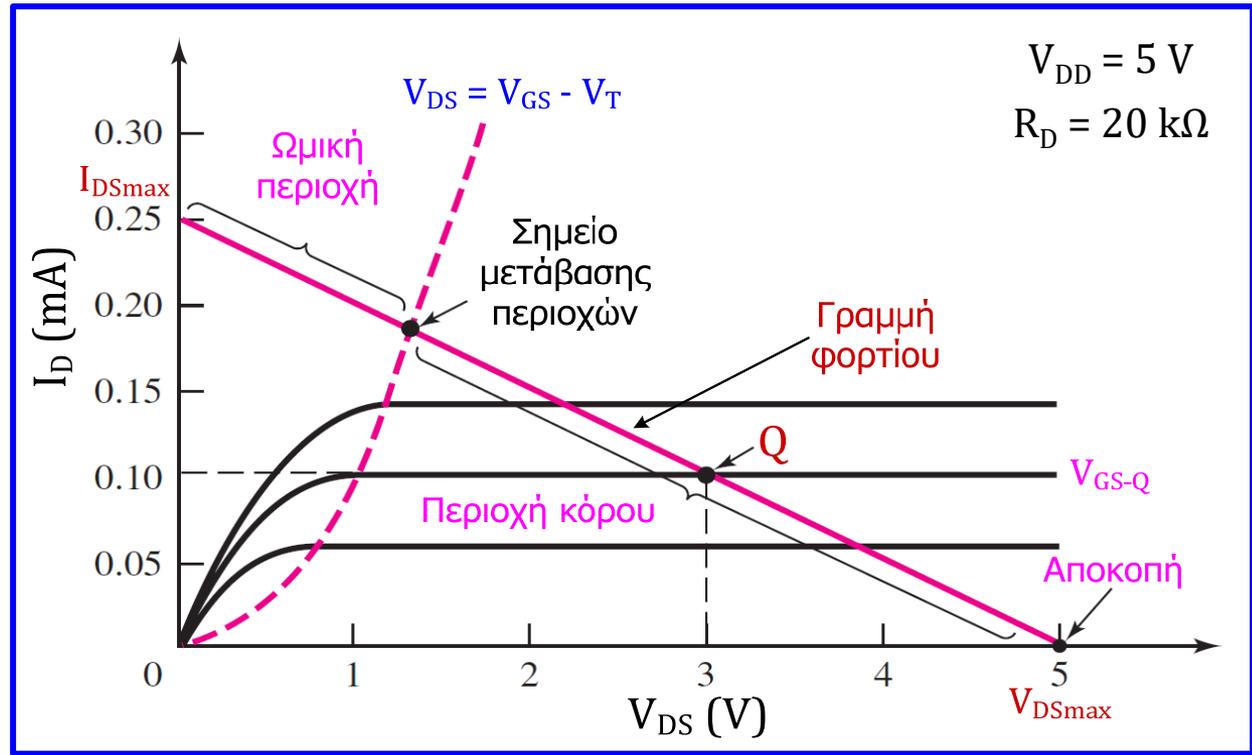
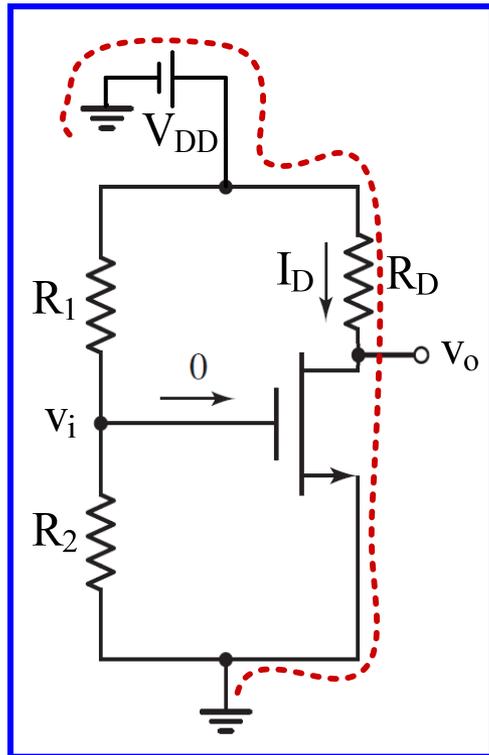
$$I_{D3} = \beta/2 (V_{SS}/2 - V_T): \text{ρεύμα πόλωσης}$$

Πόλωση MOSFET σε σύνδεση κοινής πύλης / υποδοχής

- Οι τρόποι πόλωσης που παρουσιάστηκαν αφορούσαν ενισχυτές στους οποίους το MOSFET είναι σε **σύνδεση κοινής πηγής**.
- Ωστόσο, αρκετοί από αυτούς εφαρμόζονται με αντίστοιχο τρόπο σε ενισχυτές όπου το MOSFET είναι σε **σύνδεση κοινής πύλης** και **κοινής υποδοχής**.
- Για παράδειγμα, το κύκλωμα πόλωσης με συμμετρικές πηγές τάσης, εφαρμόζεται σε MOSFET που βρίσκεται σε σύνδεση κοινής πηγής.
- Όταν το MOSFET είναι σε σύνδεση κοινής πύλης, η πύλη συνήθως συνδέεται στην γείωση. Η τάση εξόδου του MOSFET είναι η V_{DG} και ισχύει ότι: $V_{DS} = V_{DG} - V_{SG}$. Η V_{SG} είναι σταθερή (c), επομένως υπάρχει μονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ V_{DS} και V_{DG} ($V_{DS} = V_{DG} - c$).
- Αν και το ζεύγος τιμών (I_D , V_{DG}) είναι το ουσιαστικό σημείο λειτουργίας (αφού I_D είναι το ρεύμα εξόδου και V_{DG} η τάση εξόδου του MOSFET), ο **καθολικός ορισμός του σημείου λειτουργίας (ανεξάρτητα από τον τρόπο σύνδεσης του MOSFET) είναι $Q(V_{DS}, I_D)$** , χωρίς όμως να αλλάζει κάτι επί της ουσίας, λόγω της μονοσήμαντης αντιστοιχίας μεταξύ V_{DS} και V_{DG} .
- Τα κυκλώματα πόλωσης που αναλύθηκαν, αφορούσαν **τρανζίστορ nMOS**. Για κυκλώματα με **τρανζίστορ pMOS** λαμβάνουμε υπόψη όσα αναφέρονται στη σελίδα 3. Κυκλώματα πόλωσης με **τρανζίστορ pMOS** αναλύονται στις ασκήσεις 1, 7 και 8.



Γραμμή φορτίου ενισχυτή στο συνεχές



2ος κανόνας Kirchhoff στον βρόχο εξόδου:

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D \Rightarrow I_D = - (1/R_D) V_{DS} + V_{DD} / R_D$$

$$I_D = 0 \Rightarrow V_{DSmax} = V_{DD}$$

$$V_{DS} = 0 \Rightarrow I_{Dmax} = V_{DD} / R_D$$

Κλίση γραμμής φορτίου = $-1 / R_D$

Ενισχυτές με MOSFET στο εναλλασσόμενο

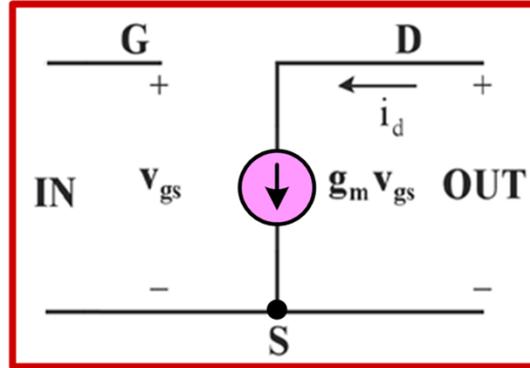
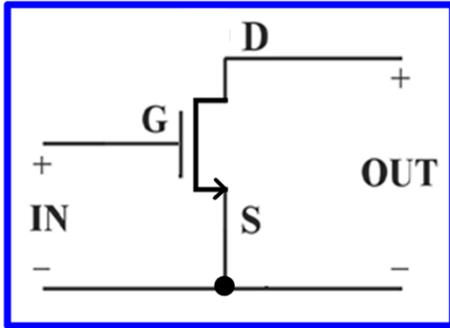
- Με τον όρο λειτουργία ενισχυτών στο εναλλασσόμενο, εννοούμε ότι στην είσοδο του ενισχυτή εφαρμόζεται ασθενές ημιτονικό σήμα τάσης και γίνεται ανάλυση για να διαπιστωθεί πως το σήμα αυτό μεταφέρεται στην έξοδο του ενισχυτή.
- Η ανάλυση ενός ενισχυτή στο εναλλασσόμενο βασίζεται στο **ισοδύναμο κύκλωμα μικρού σήματος** του ενισχυτή.
- Οι **τιμές ηρεμίας (λειτουργίας)** ρευμάτων και τάσεων που υπολογίζονται με τη μέθοδο της πόλωσης δεν επηρεάζουν την ανάλυση λειτουργίας του ισοδύναμου κυκλώματος μικρού σήματος.
- Το **ισοδύναμο κύκλωμα μικρού σήματος** χρησιμοποιείται μόνο για τον υπολογισμό των μεταβολών των τάσεων και των ρευμάτων σε σχέση με το σημείο λειτουργίας (δηλαδή, σε σχέση με τα μεγέθη V_{DS} , I_D που υπολογίστηκαν από την ανάλυση λειτουργίας στο συνεχές), που προκαλούνται από την εφαρμογή μικρού (ασθενούς) σήματος στην είσοδο του ενισχυτή.
- Κατά τη δημιουργία του **ισοδύναμου κυκλώματος** μικρού σήματος, οι **πηγές σταθερής τάσης** και οι **πυκνωτές** αντιμετωπίζονται ως **βραχυκυκλώματα**, ενώ οι **πηγές σταθερού ρεύματος** ως **ανοιχτά κυκλώματα**.
- Η ισοδυναμία των εξωτερικών πυκνωτών με βραχυκυκλώματα δεν είναι ακριβής στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων, αλλά είναι **ακριβής** στις **μεσαίες συχνότητες**.

Ενισχυτές με MOSFET στο εναλλασσόμενο

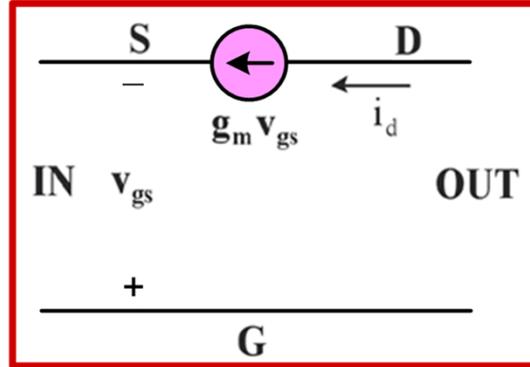
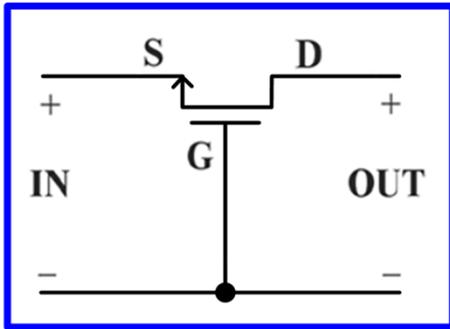
- Για να μελετήσουμε τη λειτουργία του MOSFET στο εναλλασσόμενο χρησιμοποιούμε ένα ισοδύναμο γραμμικό κύκλωμα (μοντέλο) που συνίσταται από μία **ελεγχόμενη πηγή ρεύματος** και περιγράφει τη λειτουργία του στην **περιοχή των μεσαίων και χαμηλών συχνοτήτων**.
- Στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων υφίσταται επίδραση από τις εσωτερικές χωρητικότητες των περιοχών του τρανζίστορ και έτσι το γραμμικό μοντέλο δεν προσεγγίζει με επαρκή ακρίβεια τη συμπεριφορά του τρανζίστορ.
- Αντικαθιστούμε το(α) MOSFET με το ισοδύναμο κύκλωμά του(ς), διατηρώντας τους ακροδέκτες G , S , D και τα υπόλοιπα στοιχεία στις ίδιες θέσεις με το αρχικό κύκλωμα.
- Υπολογίζουμε τα ζητούμενα μεγέθη (τάσεις, ρεύματα κλπ.) με εφαρμογή των κανόνων Kirchhoff στους κόμβους και τους βρόχους του γραμμικού κυκλώματος που προκύπτει.
- **Συμβολισμοί τάσεων και ρευμάτων**: με κεφαλαία γράμματα και δείκτες (π.χ. I_D) συμβολίζονται οι τιμές ηρεμίας, με μικρά γράμματα και δείκτες οι τιμές των μεταβολών μικρού σήματος (π.χ. i_d), ενώ με μικρά γράμματα και κεφαλαίους δείκτες οι ολικές στιγμιαίες τιμές (π.χ. i_D).
- **Επισημαίνεται ότι σε αντίθεση με την μελέτη στο DC, η μελέτη των τρανζίστορ nMOS και pMOS γίνεται με το ίδιο ισοδύναμο κύκλωμα και η ανάλυση στο AC των ενισχυτών που περιλαμβάνουν nMOS ή pMOS τρανζίστορ διενεργείται με τον ίδιο τρόπο.**

Ισοδύναμα κυκλώματα MOSFET στο εναλλασσόμενο

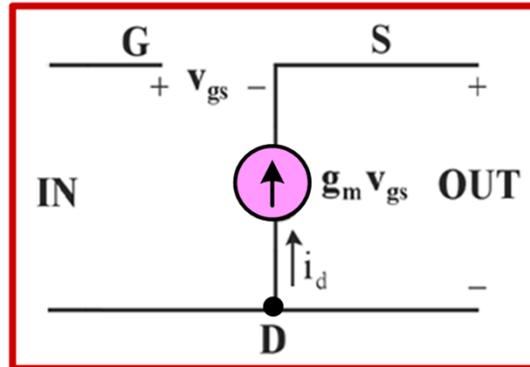
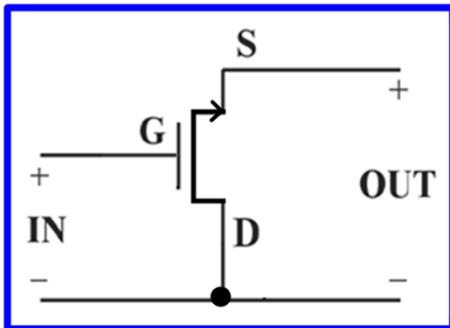
Σύνδεση κοινής πηγής (CS)



Σύνδεση κοινής Πύλης (CG)



Σύνδεση κοινής υποδοχής (CD)



Απλοποιημένα μοντέλα για χαμηλές και μεσαίες συχνότητες.

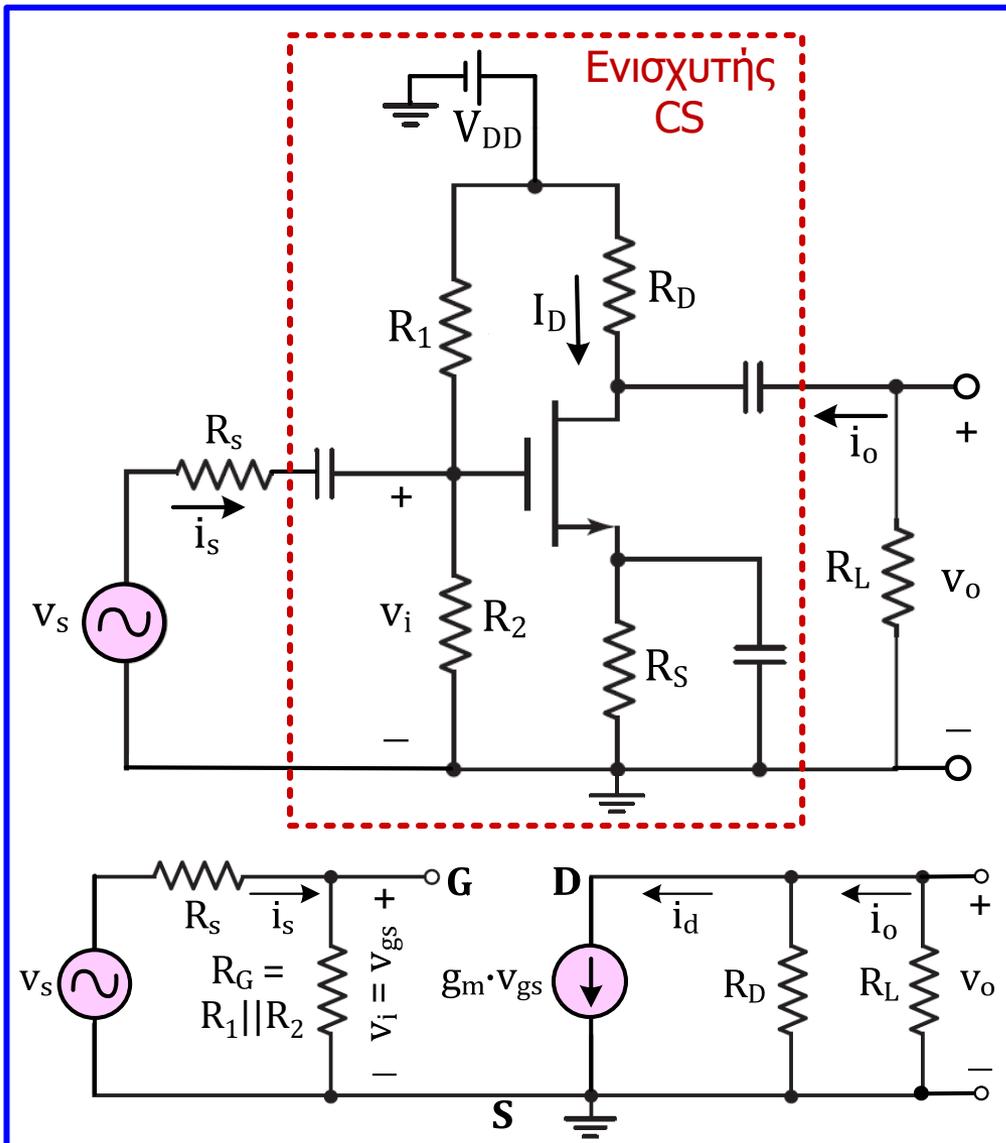
Το MOSFET αντικαθίσταται από μια ελεγχόμενη (από την τάση v_{gs}) πηγή ρεύματος και παραλείπεται η αντίσταση εξόδου ($r_o = \infty$).

g_m : διαγωγιμότητα του MOSFET.

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_T} = \sqrt{2\beta I_D}$$

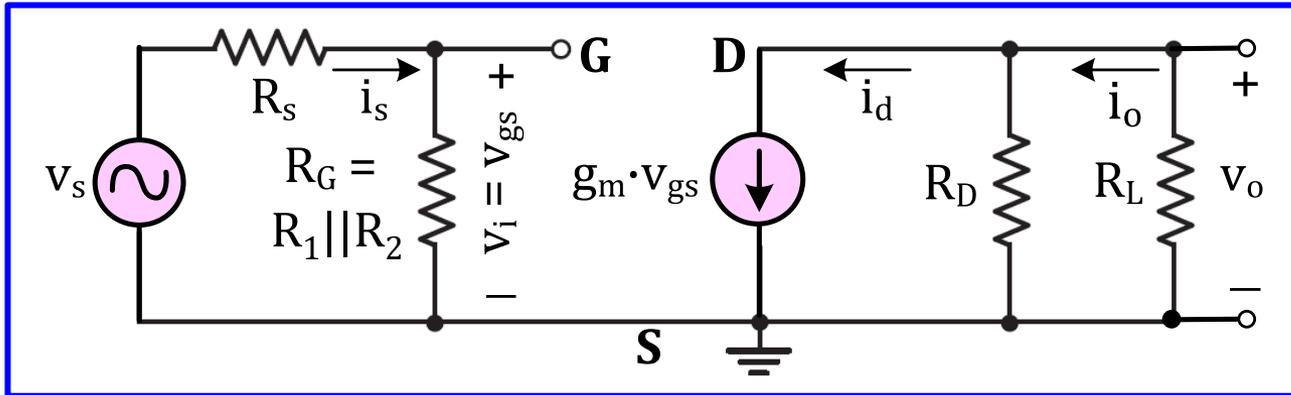
Το μηδενικό ρεύμα πύλης ($i_g = 0$) μοντελοποιείται ως ανοικτό κύκλωμα.

Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής πηγής



- Ο ενισχυτής συνδέεται με **πηγή τάσης v_s** με εσωτερική αντίσταση R_s στην είσοδο και με **φορτίο R_L** στην έξοδο.
- Παρατηρούμε ότι στο ισοδύναμο κύκλωμα **δεν υπάρχουν ποσότητες συνεχούς**, δηλαδή η τάση τροφοδοσίας (V_{DD}) έχει αντικατασταθεί από βραχυκύκλωμα, αφού ο ακροδέκτης του κυκλώματος που συνδέεται σε αυτή έχει πάντα σταθερή τάση.
- Έτσι, **κάθε ακροδέκτης του κυκλώματος που συνδέεται στην πηγή σταθερής τάσης, θεωρείται γείωση** στο ισοδύναμο κύκλωμα.
- Οι **πυκνωτές** αντικαθίστανται από **βραχυκυκλώματα**, με αποτέλεσμα η **αντίσταση R_s να μην συμμετέχει** στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής πηγής



$$V_i = V_{gs} = \frac{R_G}{R_s + R_G} V_s$$

- Ενίσχυση τάσης χωρίς πηγή σήματος, με φορτίο:

$$R'_L = R_D \parallel R_L, \quad v_o = -g_m v_{gs} R'_L \Rightarrow A_{v_i} = v_o / v_i = -g_m R'_L$$

- Ενίσχυση τάσης χωρίς πηγή σήματος και φορτίο ($R_L = \infty$):

$$A_{v_o} = v_o / v_i = -g_m R_D$$

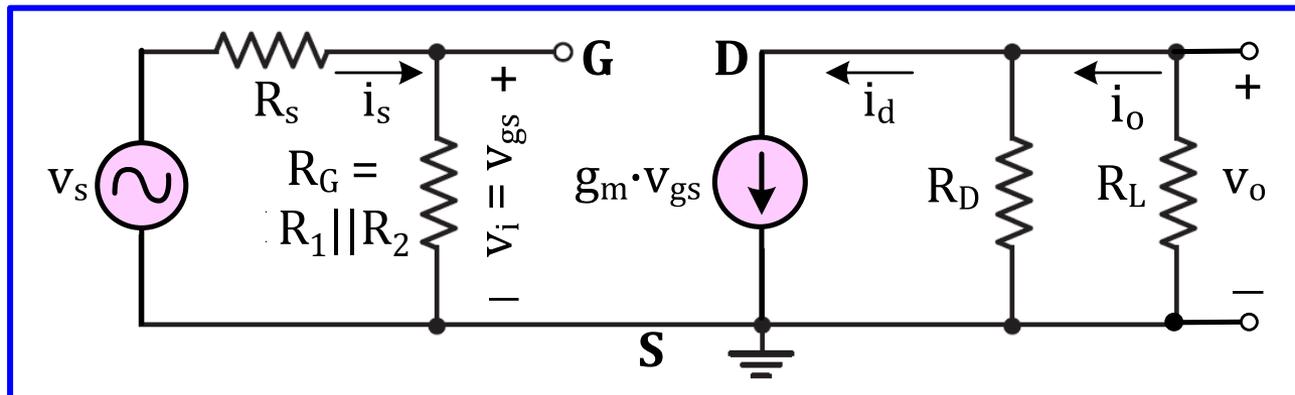
- Ενίσχυση τάσης με πηγή σήματος και φορτίο:

$$v_o = -g_m v_{gs} R'_L \Rightarrow v_o = -g_m R'_L \frac{R_G}{R_s + R_G} v_s \Rightarrow$$

$$A_{v_s} = v_o / v_s = -g_m R'_L \frac{R_G}{R_s + R_G}$$

Τα σήματα τάσης εισόδου και εξόδου έχουν διαφορά φάσης 180°

Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής πηγής



- Ενίσχυση ρεύματος (με βραχυκύκλωση του φορτίου, $R_L = 0$):

$$i_o = g_m v_{gs} = g_m R_G i_s \Rightarrow A_{i0} = i_o / i_s = g_m R_G$$

- Ενίσχυση ρεύματος με πηγή σήματος και φορτίο:

$$i_o = \frac{R_D}{R_D + R_L} g_m v_{gs} = \frac{R_D}{R_D + R_L} g_m R_G i_s \Rightarrow A_{iL} = i_o / i_s = \frac{R_D}{R_D + R_L} g_m R_G$$

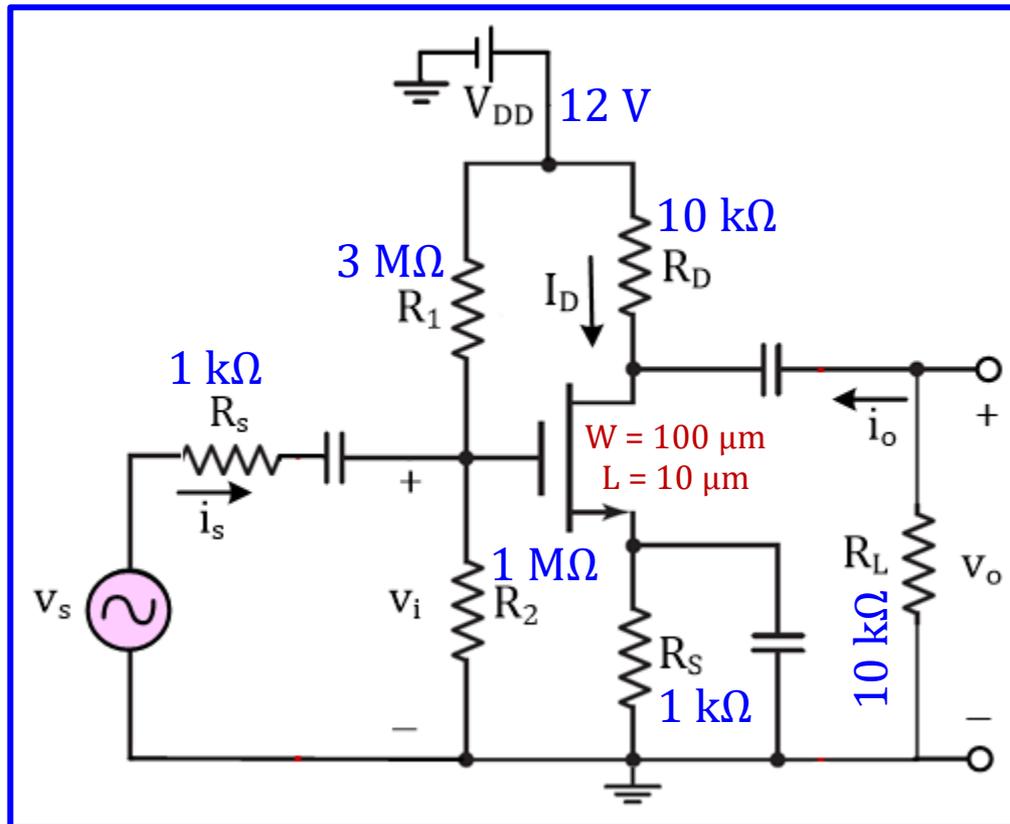
- Ενίσχυση ισχύος: γινόμενο ενίσχυσης τάσης και ενίσχυσης ρεύματος.

- Αντίσταση εισόδου: $R_i = v_i / i_s = R_G$

- Αντίσταση εξόδου (για $v_i = 0$, $R_L = \infty$): $R_o = v_o / i_o = R_D$

Παράδειγμα 4^ο: ενισχυτής κοινής πηγής

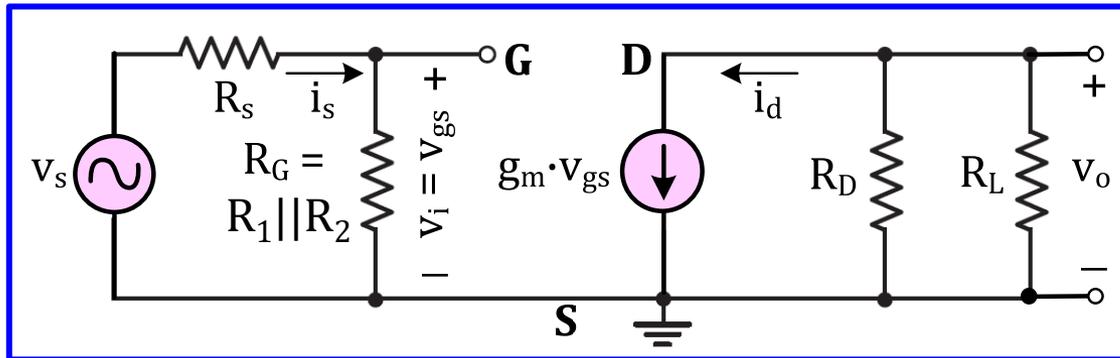
Στον ενισχυτή κοινής πηγής του σχήματος εφαρμόζεται ημιτονική τάση εισόδου πλάτους 25 mV και συχνότητας 20 kHz. Θα προσδιορίσουμε τα μεγέθη: A_{vs} , R_i , R_o και θα σχεδιάσουμε τις κυματομορφές των σημάτων της τάσης εισόδου και της τάσης εξόδου, για διάστημα μιας περιόδου. Για το MOSFET δίνονται: $K_p = 50 \mu\text{A} / \text{V}^2$, $I_D = 0,42 \text{ mA}$.



$$\beta = K_p(W/L) = 0,5 \text{ mA} / \text{V}^2$$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 648 \mu\text{S}$$

Παράδειγμα 4^ο: ενισχυτής κοινής πηγής



$$R'_L = R_D \parallel R_L = 5 \text{ k}\Omega$$

$$R_G = R_1 \parallel R_2 = 0,75 \text{ M}\Omega$$

$$V_o = -g_m V_i R'_L$$

$$V_i = \frac{R_G}{R_s + R_G} V_s$$

$$V_o = -g_m \frac{R_G}{R_s + R_G} V_s R'_L$$

$$A_{vs} = \frac{V_o}{V_s} = -g_m \frac{R_G}{R_s + R_G} R'_L = -3.23$$

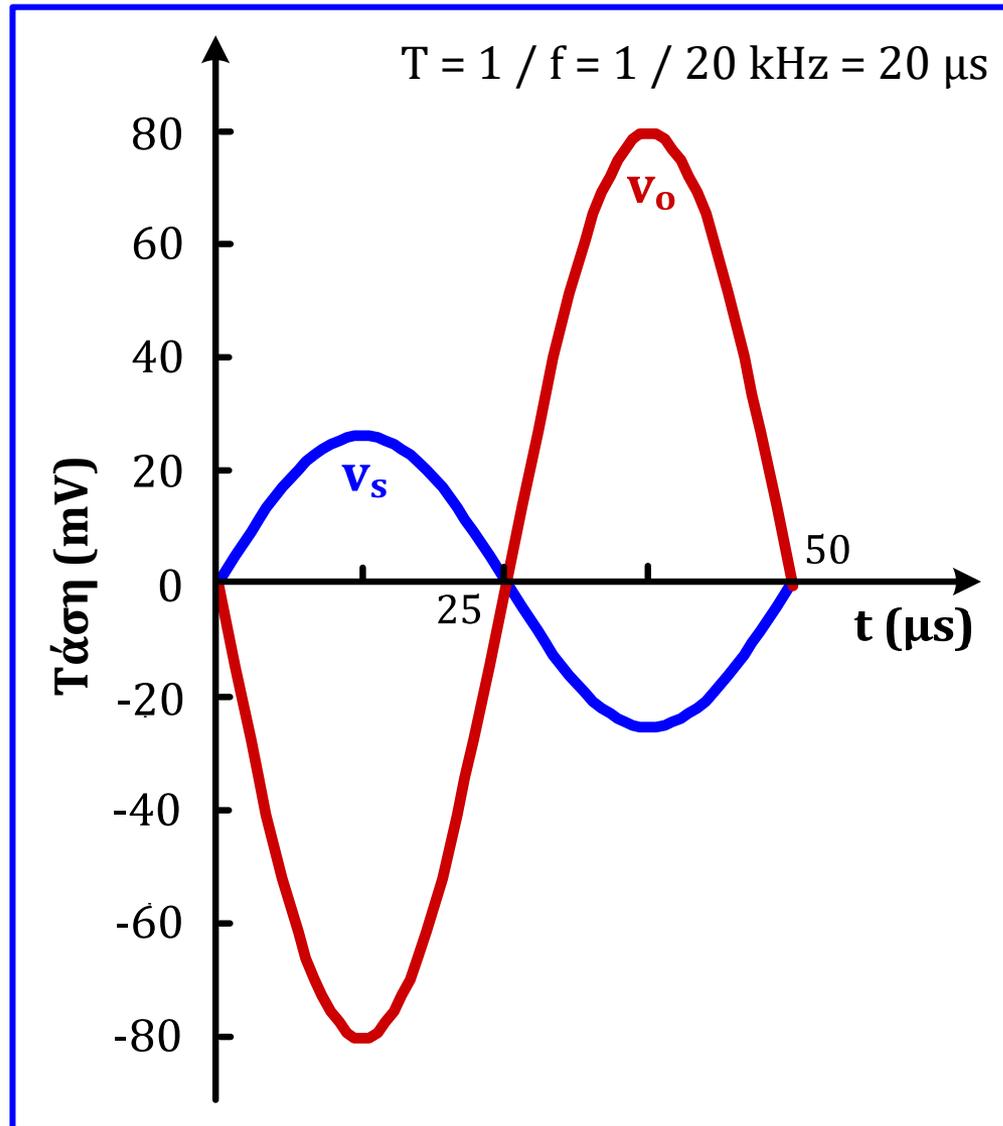
$$R_o = \frac{V_o}{i_o} \Big|_{(v_i=0, R_L=\infty)} = R_D$$

$$R_i = \frac{V_i}{i_s} = R_G$$

- Το μείον που προκύπτει στην ενίσχυση σημαίνει **διαφορά φάσης 180°, μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου.**
- Στην χάραξη των κυματομορφών είναι εμφανής η ενίσχυση του σήματος εισόδου που προέκυψε από τους υπολογισμούς, καθώς επίσης και η διαφορά φάσης των 180°.

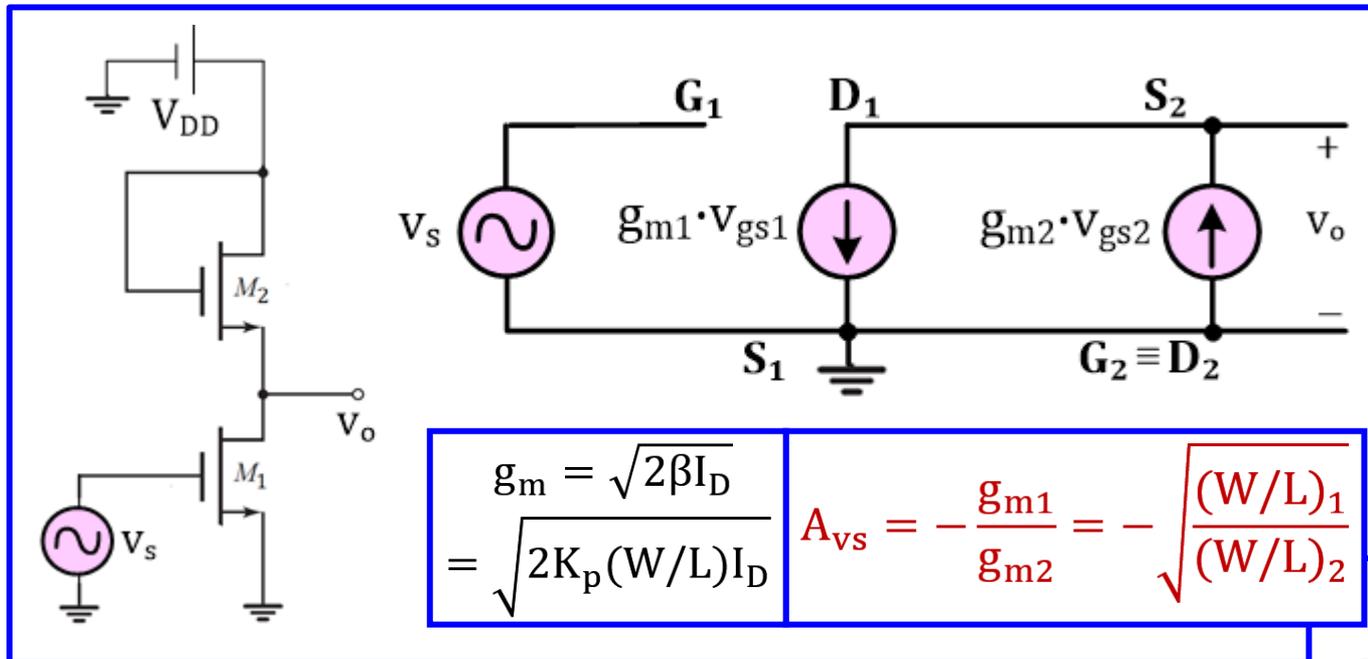
Παράδειγμα 4^ο: ενισχυτής κοινής πηγής

$$V_o = -3.23 V_s$$



Βαθμίδα ενισχυτή κοινής πηγής χωρίς αντιστάσεις

- Όπως προαναφέρθηκε στην κατασκευή των ενισχυτών MOSFET σε ολοκληρωμένο κύκλωμα, οι **αντιστάσεις αντικαθίστανται από MOSFET**.
- Τα MOSFET αυτά αναφέρονται ως **ενεργά φορτία και πλεονεκτούν έναντι των ωμικών αντιστάσεων**, διότι καταλαμβάνουν μικρότερο χώρο στην επιφάνεια των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια.



Το MOSFET Q_2 έχει ρόλο αντίστασης και αποτελεί το ενεργό φορτίο του MOSFET Q_1 της απλής βαθμίδας ενίσχυσης. Στο ενεργό φορτίο η πύλη συνδέεται με την υποδοχή ($v_{ds2} = v_{gs2}$).

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = \sqrt{2K_p(W/L)I_D}$$

$$A_{vs} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} = -\sqrt{\frac{(W/L)_1}{(W/L)_2}}$$

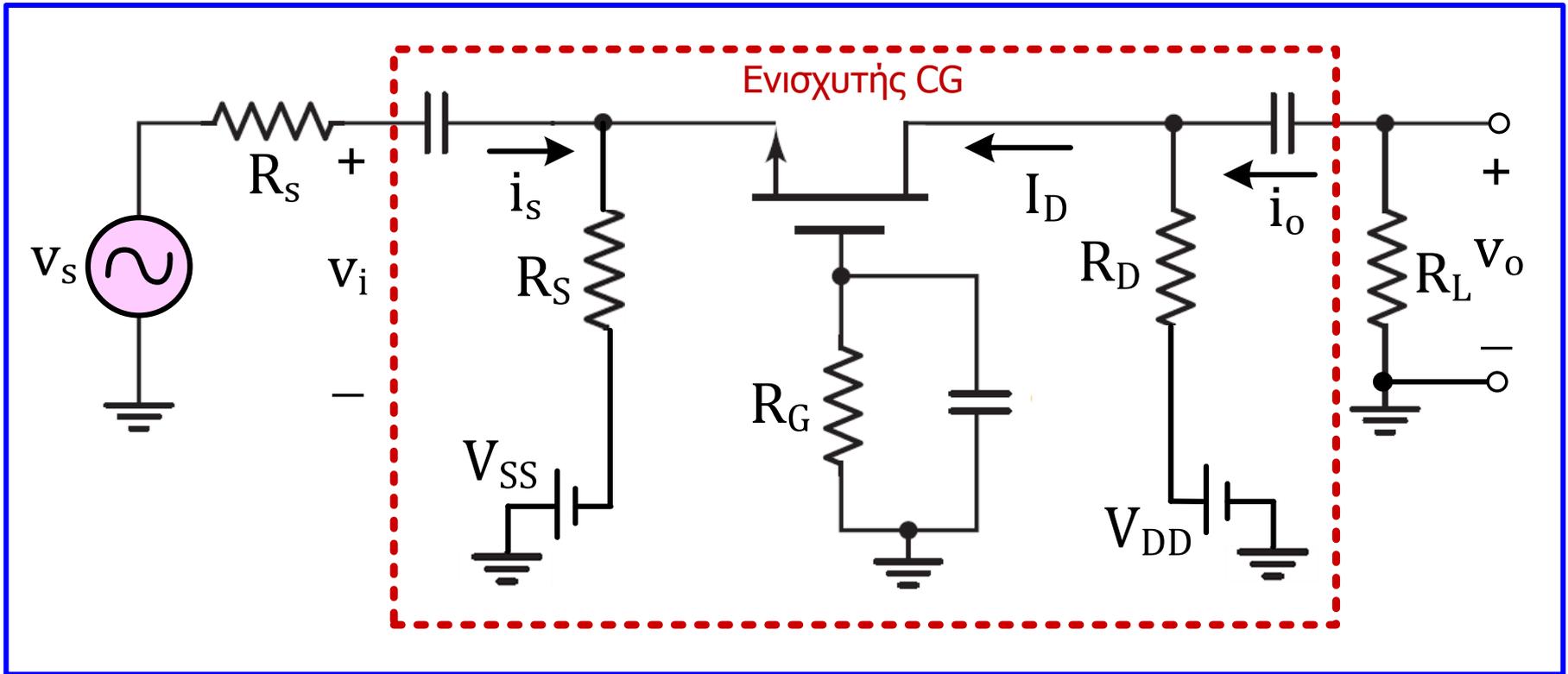
- Μπορούμε να αντικαταστήσουμε τον κλάδο της δεύτερης πηγής ρεύματος με μία αντίσταση που διαρρέεται από ρεύμα όμοιο με αυτό που παράγει η πηγή: $R = v_{ds2} / (g_{m2} \cdot v_{gs2}) = 1 / g_{m2}$

$$A_{vs} = v_o / v_s = (-g_{m1} v_{gs1} R) / v_{gs1}$$

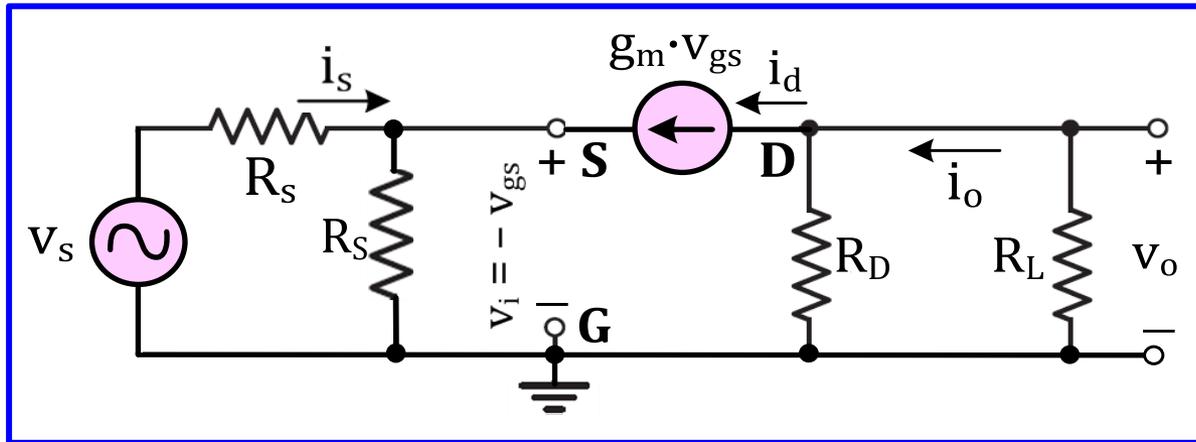
$$\Rightarrow A_{vs} = -g_{m1} / g_{m2}$$

$$g_{m1} > g_{m2} \Rightarrow |A_{vs}| > 1$$

Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής πύλης



Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής πύλης



$$R'_L = R_D \parallel R_L$$

- Ενίσχυση τάσης χωρίς πηγή σήματος, με φορτίο:

$$v_o = -g_m v_{gs} R'_L \Rightarrow v_o = g_m v_i R'_L, \quad A_{v_i} = v_o / v_i = g_m R'_L$$

- Ενίσχυση τάσης χωρίς πηγή σήματος και φορτίο ($R_L = \infty$):

$$A_{v_o} = v_o / v_i = g_m R_D$$

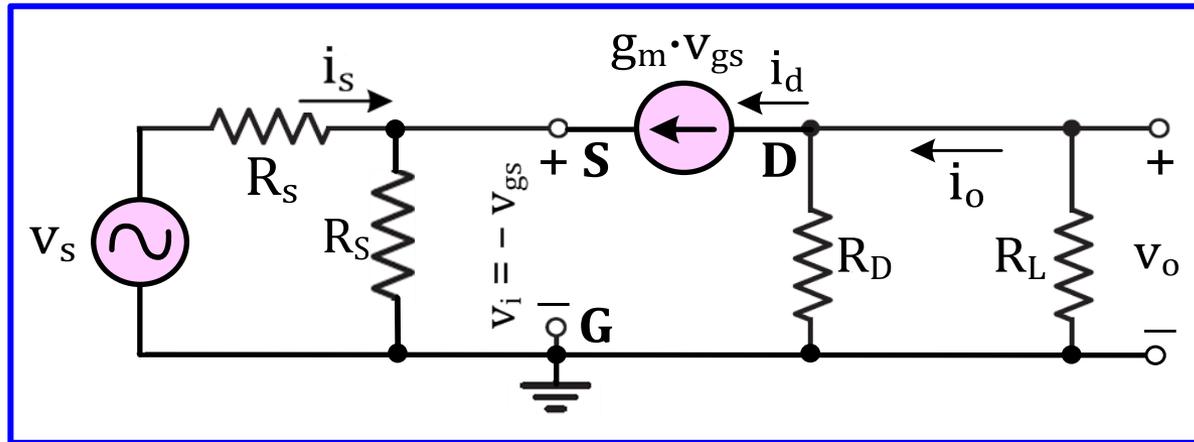
Συμφασικά σήματα
τάσης εισόδου και εξόδου

- Ενίσχυση τάσης με πηγή σήματος και φορτίο:

$$v_i = [R_i / (R_i + R_s)] v_s \Rightarrow -v_{gs} = [R_i / (R_i + R_s)] v_s, \quad v_o = -g_m v_{gs} R'_L \Rightarrow$$

$$v_o = g_m R'_L [R_i / (R_i + R_s)] v_s, \quad A_{v_s} = v_o / v_s = g_m R'_L [R_i / (R_i + R_s)]$$

Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής πύλης



- **Ενίσχυση ρεύματος** (με βραχυκύκλωση του φορτίου, $R_L = 0$):

$$i_o = g_m v_{gs}, \quad v_{gs} = - (i_s + i_d) R_S = - (i_s + g_m v_{gs}) R_S \Rightarrow v_{gs} = - i_s R_S / (1 + g_m R_S),$$

$$A_{i_o} = i_o / i_s \Rightarrow A_{i_o} = - g_m R_S / (1 + g_m R_S) \quad \text{Όταν } g_m R_S \gg 1 \Rightarrow |A_{i_o}| = 1$$

- **Ενίσχυση ρεύματος με πηγή σήματος και φορτίο:**

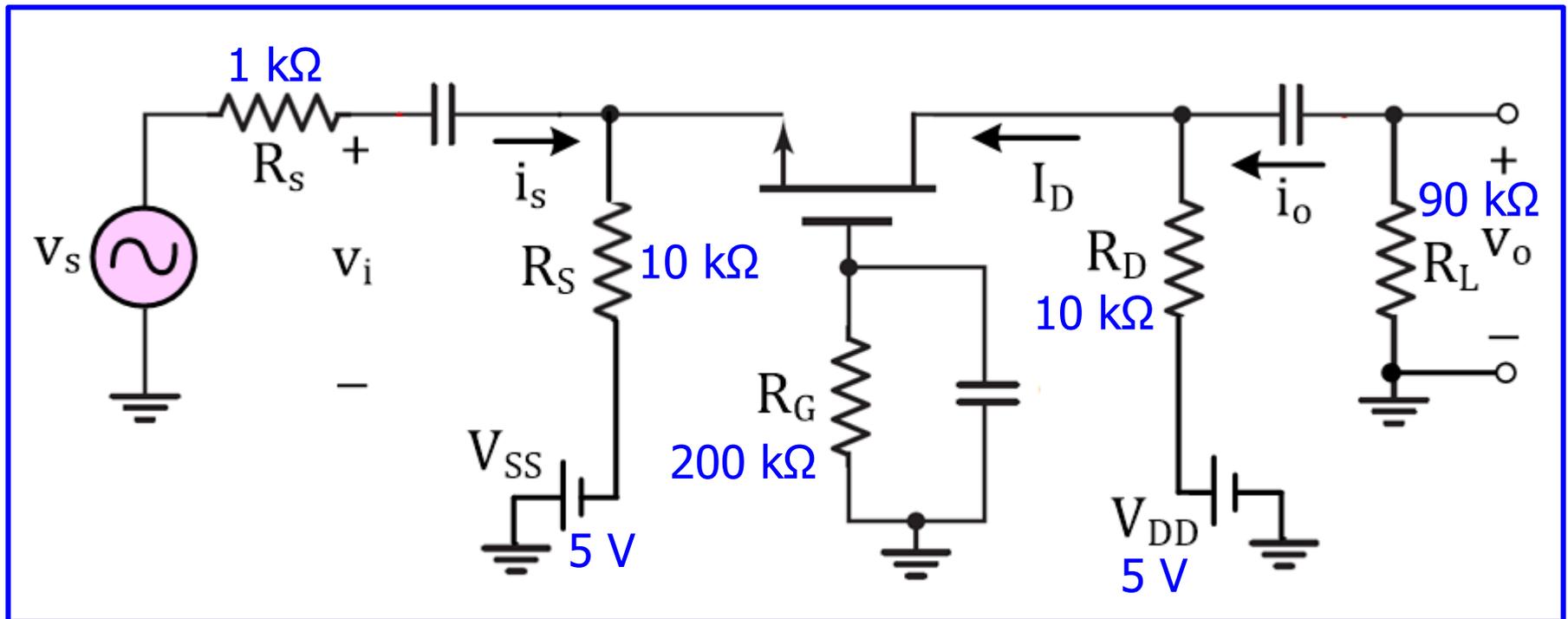
$$i_o = \frac{R_D}{R_D + R_L} g_m v_{gs} \Rightarrow A_{i_{L}} = - \frac{R_D}{R_D + R_L} \frac{g_m R_S}{(1 + g_m R_S)} \quad |A_{i_{L}}| < 1$$

- **Αντίσταση εισόδου:** $R_i = v_i / i_s = - v_{gs} / i_s \Rightarrow R_i = R_S / (1 + g_m R_S)$

- **Αντίσταση εξόδου** (για $v_i = 0, R_L = \infty$): $R_o = v_o / i_o = R_D$

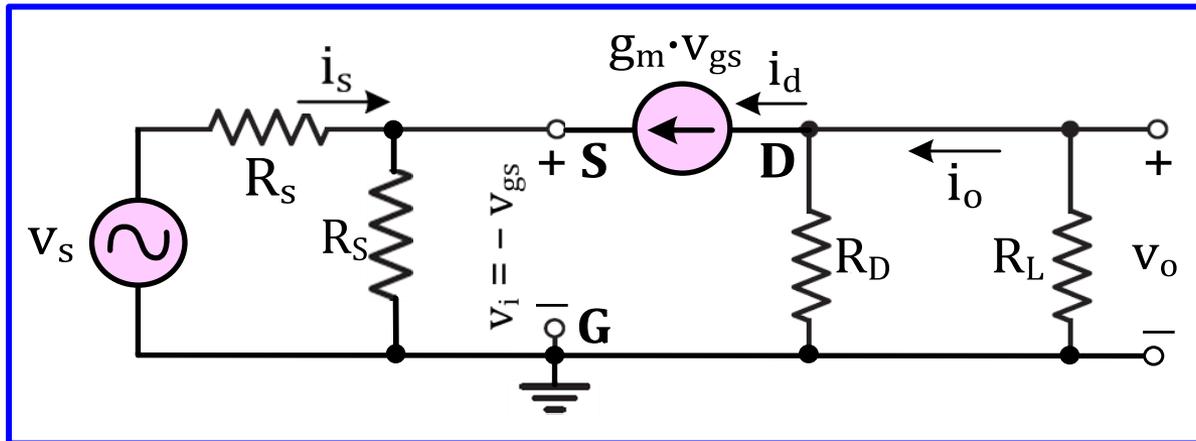
Παράδειγμα 5^ο: ενισχυτής κοινής πύλης

Δίνεται ο ενισχυτής κοινής πύλης του παρακάτω σχήματος. Για το MOSFET δίνονται $\beta = 0,8 \text{ mA/V}^2$, ρεύμα λειτουργίας (I_D) $0,5 \text{ mA}$.
Θα προσδιορίσουμε τα μεγέθη: A_{vs} , R_i , R_o .



$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 894 \mu\text{S}$$

Παράδειγμα 5^ο: ενισχυτής κοινής πύλης



$$R'_L = R_D \parallel R_L = 9 \text{ k}\Omega$$

$$i_o = g_m v_{gs}, v_{gs} = - (i_s + i_d) R_S = - (i_s + g_m v_{gs}) R_S \Rightarrow v_{gs} = - i_s R_S / (1 + g_m R_S)$$

$$R_i = v_i / i_s = - v_{gs} / i_s \Rightarrow R_i = R_S / (1 + g_m R_S) \Rightarrow R_i = 1 \text{ k}\Omega$$

$$v_i = [R_i / (R_i + R_S)] v_s \Rightarrow v_{gs} = - [R_i / (R_i + R_S)] v_s$$

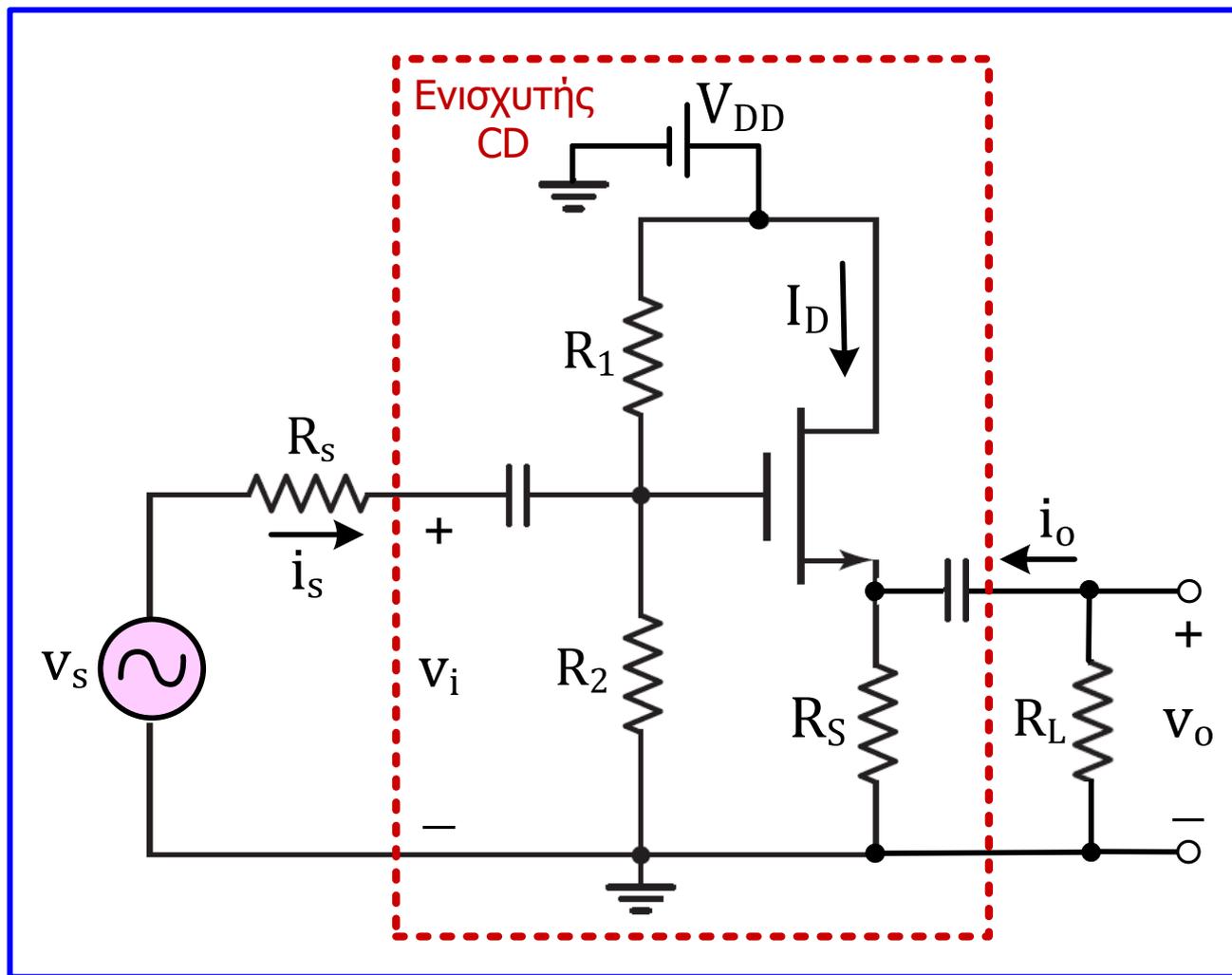
$$v_o = - g_m v_{gs} R'_L \Rightarrow v_o = g_m R'_L [R_i / (R_i + R_S)] v_s$$

$$A_{vs} = v_o / v_s = g_m R'_L [R_i / (R_i + R_S)] \Rightarrow A_{vs} = 4,02$$

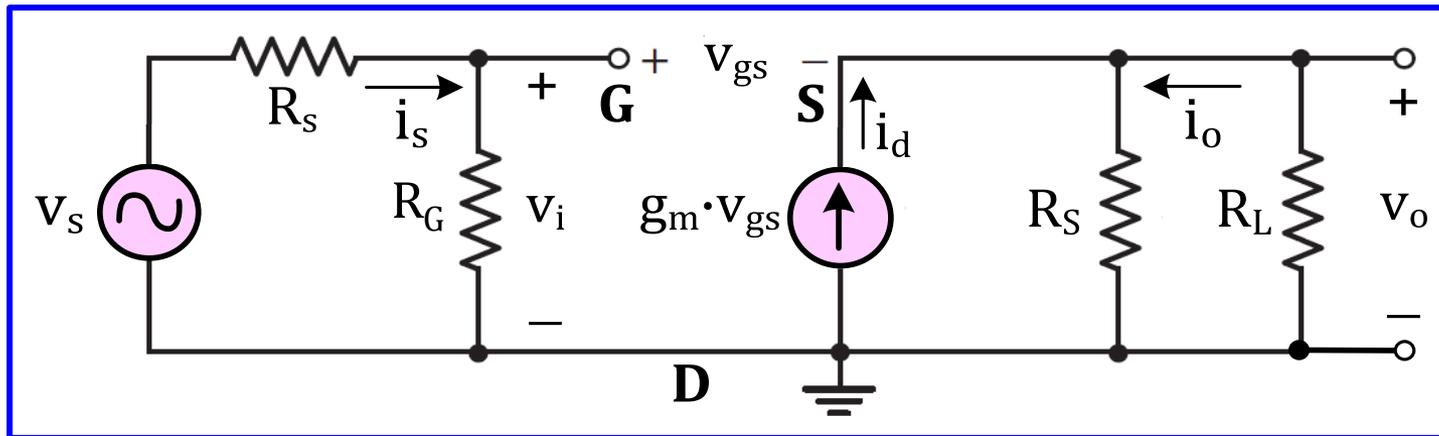
$$R_o = v_o / i_o = R_D \Rightarrow R_o = 10 \text{ k}\Omega \text{ (για } v_i = 0, R_L = \infty)$$

Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής υποδοχής

- Η απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής υποδοχής αναφέρεται και ως **ακολουθητής** ή **ακόλουθος πηγής**, αφού η τάση στον ακροδέκτη πηγής ακολουθεί την τάση εισόδου.
- Τα κύρια χαρακτηριστικά του ενισχυτή αυτού είναι η **μεγάλη αντίσταση εισόδου**, η **μικρή αντίσταση εξόδου** και η περίπου **μοναδιαία ενίσχυση τάσης**, που τον καθιστά εύχρηστο ως **απομονωτή τάσης (buffer)**.



Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής υποδοχής



$$R_G = R_1 || R_2$$

- Ενίσχυση τάσης χωρίς πηγή σήματος, με φορτίο:

$$R'_L = R_S // R_L, v_i = v_{gs} + v_o \Rightarrow v_{gs} = v_i - v_o, v_o = g_m v_{gs} R'_L = g_m (v_i - v_o) R'_L \Rightarrow$$

$$v_o = g_m R'_L v_i / (1 + g_m R'_L) \Rightarrow A_{v_i} = v_o / v_i = g_m R'_L / (1 + g_m R'_L)$$

- Ενίσχυση τάσης χωρίς πηγή σήματος και φορτίο ($R_L = \infty$):

$$A_{v_o} = v_o / v_i = g_m R_S / (1 + g_m R_S)$$

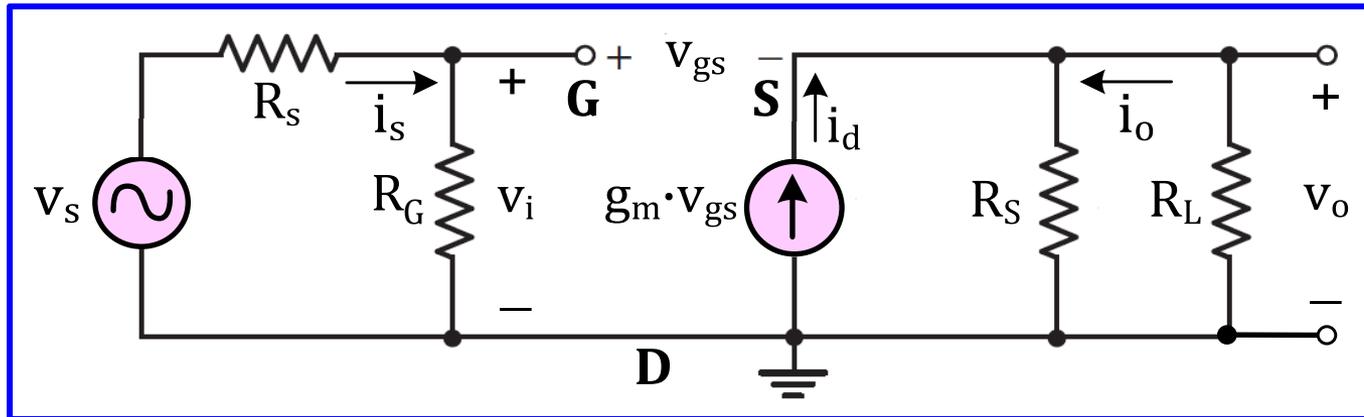
Όταν $g_m R_S \gg 1$
 $\Rightarrow A_{v_o} = 1$

- Ενίσχυση τάσης με πηγή σήματος και φορτίο:

$$v_i = \frac{R_G}{R_s + R_G} v_s, A_{v_s} = v_o / v_s = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \frac{R_G}{R_s + R_G}$$

$A_{v_s} < 1$

Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής υποδοχής



- Ενίσχυση ρεύματος (με βραχυκύκλωση του φορτίου, $R_L = 0$):

$$i_s = v_i / R_G = (v_{gs} + v_o) / R_G = (v_{gs} + g_m v_{gs} R_S) / R_G \Rightarrow$$

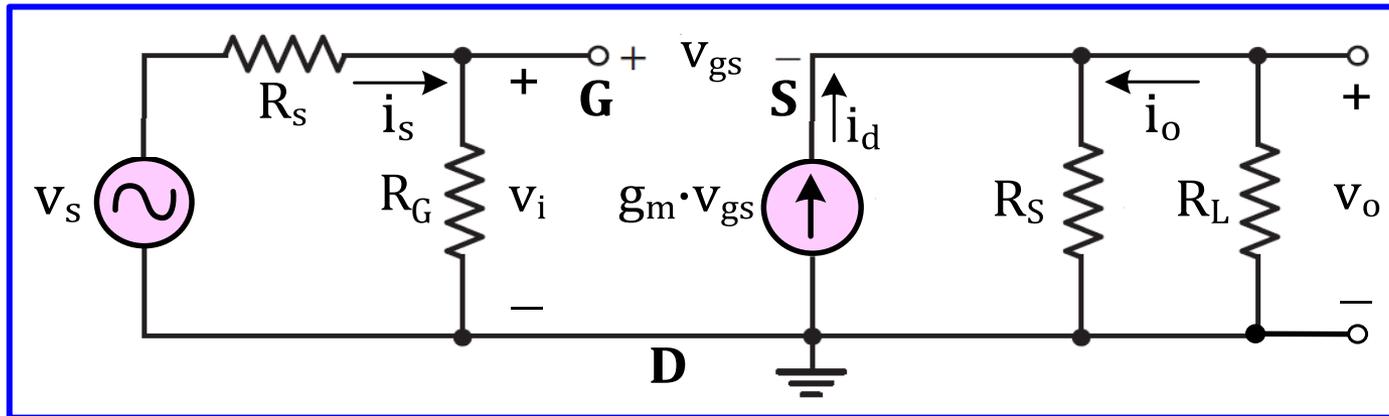
$$v_{gs} = R_G i_s / (1 + g_m R_S), i_o = -g_m v_{gs} \Rightarrow i_o = -g_m R_G i_s / (1 + g_m R_S),$$

$$A_{i0} = i_o / i_s = -g_m R_G / (1 + g_m R_S)$$

- Ενίσχυση ρεύματος με πηγή σήματος και φορτίο:

$$i_o = -g_m v_{gs} \frac{R_S}{R_S + R_L}, A_{iL} = i_o / i_s = -\frac{g_m R_G}{1 + g_m R'_L} \frac{R_S}{R_S + R_L}$$

Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής υποδοχής



- Αντίσταση εισόδου: $R_i = v_i / i_s = (i_s R_G) / i_s \Rightarrow R_i = R_G$

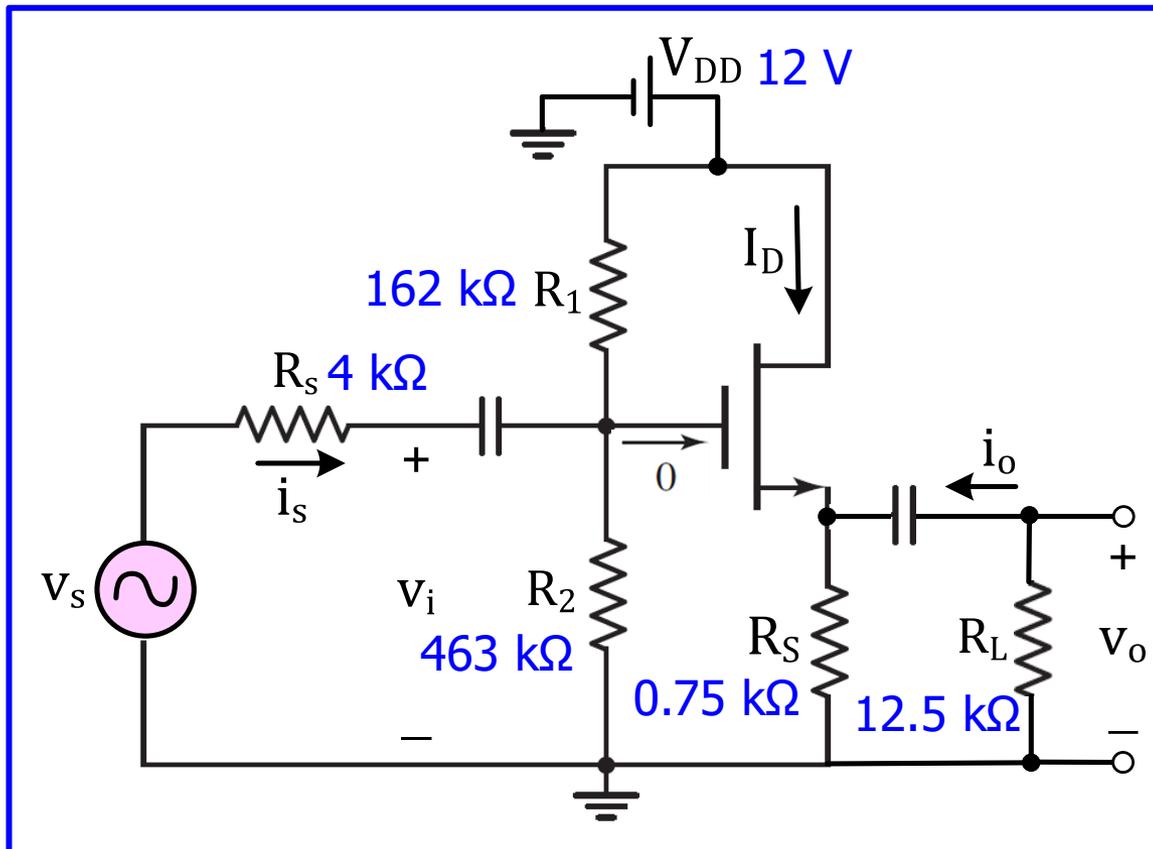
- Αντίσταση εξόδου (για $v_i = 0, R_L = \infty$):

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} = \frac{v_o}{i_{R_S} - g_m v_{gs}} = \frac{v_o}{\frac{v_o}{R_S} - g_m (v_i - v_o)} = \frac{v_o}{\frac{v_o}{R_S} + g_m v_o} = \frac{1}{\frac{1}{R_S} + g_m}$$

$$\Rightarrow R_o = R_S \parallel \frac{1}{g_m}$$

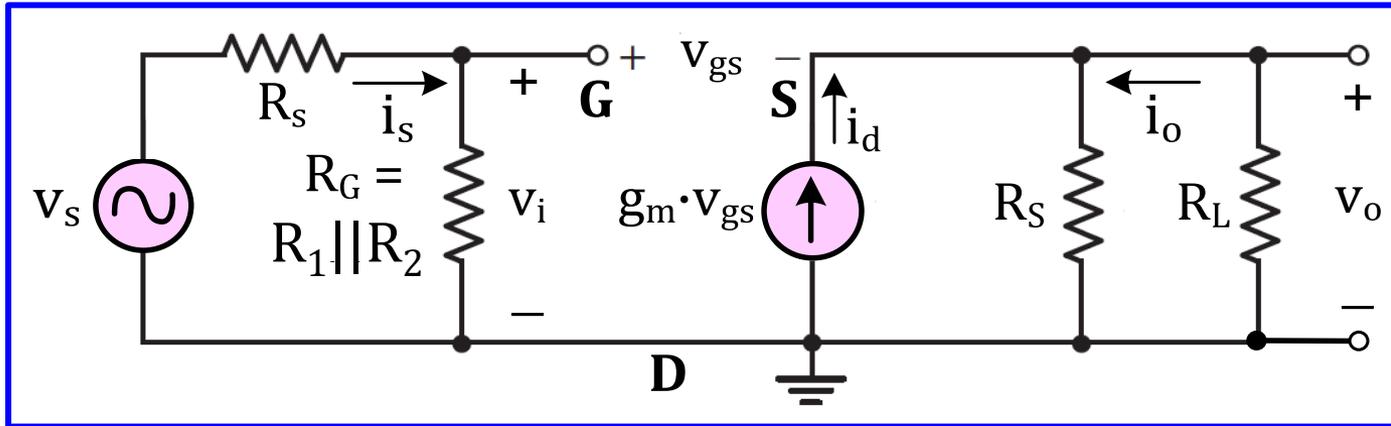
Παράδειγμα 6^ο: ενισχυτής κοινής υποδοχής

Δίνεται ο ενισχυτής του σχήματος με πηγή ημιτονικής τάσης πλάτους 20 mV και συχνότητας 20 kHz. Για το MOSFET δίνονται: $\beta = 8 \text{ mA/V}^2$, ρεύμα λειτουργίας (I_D) 8 mA. Θα προσδιορίσουμε τα μεγέθη A_{vs} , R_i , R_o και θα σχεδιάσουμε τις κυματομορφές των τάσεων v_s , v_o σε κοινούς άξονες για διάστημα μιας περιόδου.



$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 11,3 \text{ mS}$$

Παράδειγμα 6^ο: ενισχυτής κοινής υποδοχής



$$R_G = R_1 \parallel R_2 = 120 \text{ k}\Omega$$

$$R'_L = R_S \parallel R_L = 0,7 \text{ k}\Omega$$

$$v_i = v_{gs} + v_o \Rightarrow v_{gs} = v_i - v_o$$

$$v_o = g_m v_{gs} R'_L = g_m (v_i - v_o) R'_L \Rightarrow v_o = g_m R'_L v_i / (1 + g_m R'_L)$$

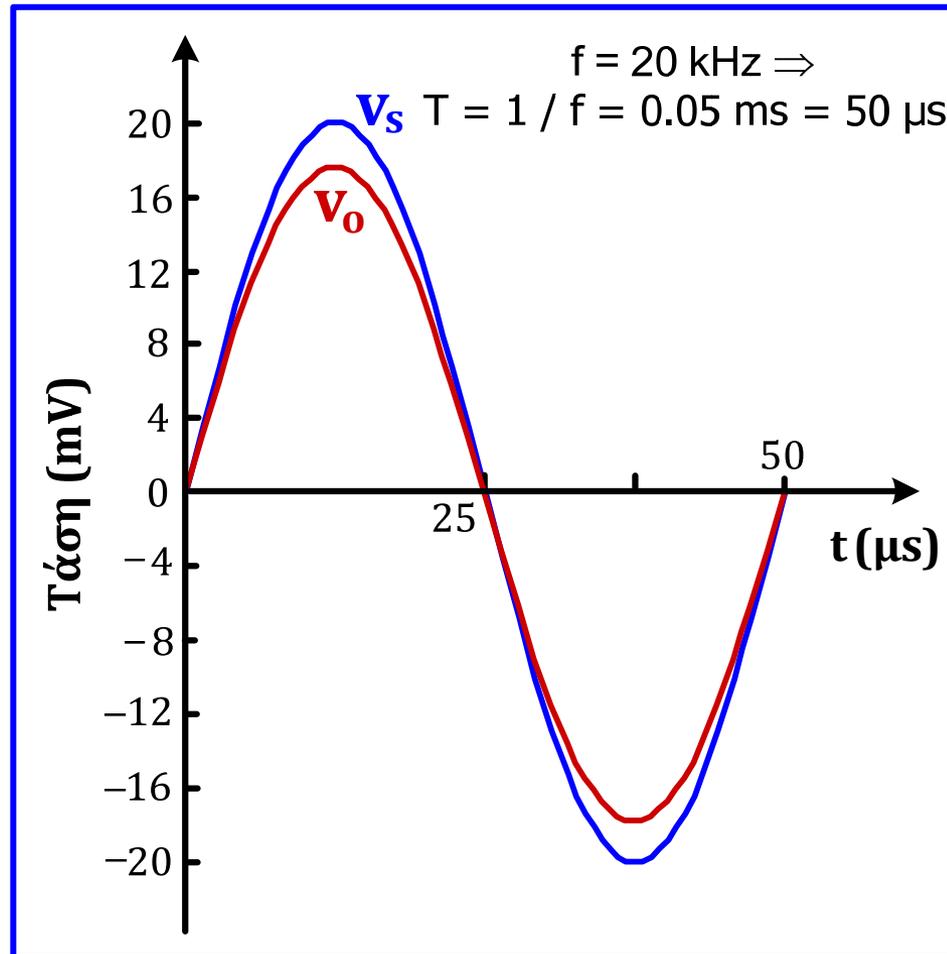
$$R_i = R_G = 120 \text{ k}\Omega$$

$$v_i = \frac{R_G}{R_s + R_G} v_s \quad v_o = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \frac{R_G}{R_s + R_G} v_s$$

$$R_o = R_S \parallel (1/g_m) = 80 \Omega$$

$$A_{vs} = v_o / v_s = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \frac{R_G}{R_s + R_G} \Rightarrow A_{vs} = 0,86 < 1$$

Παράδειγμα 6^ο: ενισχυτής κοινής υποδοχής



Η τάση εξόδου παρουσιάζεται ελαφρώς εξασθενημένη σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση εισόδου και χωρίς διαφορά φάσης.

Χαρακτηριστικά μεγέθη ενισχυτών με MOSFET

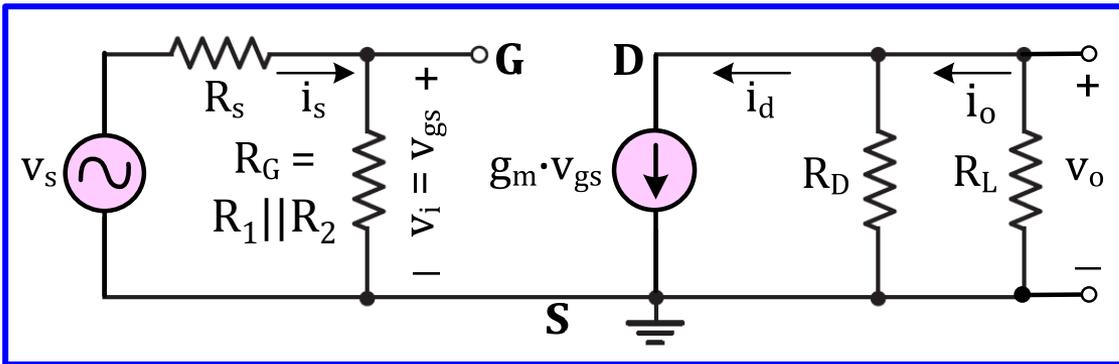
- **Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής πηγής (CS):**
 - ✓ Ενίσχυση τάσης και ρεύματος (>1), οπότε και σημαντική ενίσχυση ισχύος
 - ✓ Μεγάλες αντιστάσεις εισόδου και εξόδου
- **Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής πύλης (CG):**
 - ✓ Ενίσχυση τάσης (>1)
 - ✓ Μοναδιαία ενίσχυση ρεύματος
 - ✓ Μικρή αντίσταση εισόδου
 - ✓ Μεγάλη αντίσταση εξόδου
- **Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής υποδοχής (CD):**
 - ✓ Μοναδιαία ενίσχυση τάσης
 - ✓ Ενίσχυση ρεύματος (>1)
 - ✓ Μεγάλη αντίσταση εισόδου
 - ✓ Μικρή αντίσταση εξόδου

Οι απλές βαθμίδες ενισχυτών με MOSFET, παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τις αντίστοιχες απλές βαθμίδες ενισχυτών με διπολικά τρανζίστορ (κοινού εκπομπού, κοινής βάσης και κοινού συλλέκτη)

Γραμμή φορτίου ενισχυτή στο εναλλασσόμενο

- Η γραμμή φορτίου στο συνεχές είναι η γραφική παράσταση του 2^{ου} κανόνα Kirchhoff στο βρόχο εξόδου του κυκλώματος του ενισχυτή στο συνεχές.
- Η **γραμμή φορτίου** στο **εναλλασσόμενο** προκύπτει με όμοιο τρόπο από τον βρόχο εξόδου του ισοδύναμου κυκλώματος μικρού σήματος.
- Υπενθυμίζεται ότι με κεφαλαία γράμματα και δείκτες (π.χ. I_D) συμβολίζονται οι τιμές ηρεμίας, με μικρά γράμματα και δείκτες οι τιμές των μεταβολών μικρού σήματος (π.χ. i_d) ενώ με μικρά γράμματα και κεφαλαίους δείκτες οι ολικές στιγμιαίες τιμές (π.χ. i_D).

Ισοδύναμο κύκλωμα ενισχυτή κοινής πηγής στο ac
(πόλωση με διαιρέτη τάσης χωρίς αντίσταση πηγής)



$$R'_L = R_L \parallel R_D$$

$$v_o = v_{ds} = -i_d R'_L \Rightarrow$$

$$v_{DS} - V_{DS} = -(i_D - I_D) R'_L \Rightarrow$$

$$i_D = -\frac{1}{R'_L} v_{DS} + \frac{V_{DS}}{R'_L} + I_D$$

Γραμμή φορτίου ενισχυτή στο εναλλασσόμενο

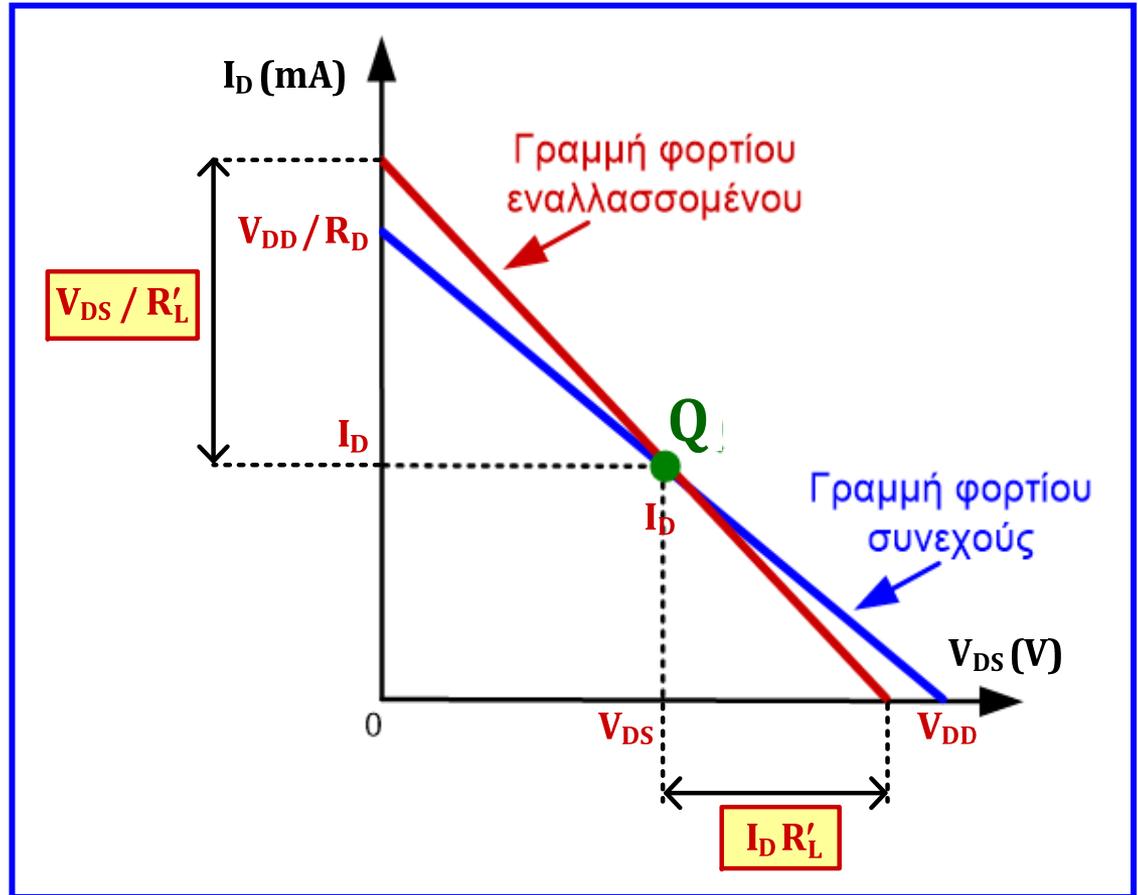
Η γραμμή φορτίου στο εναλλασσόμενο έχει κλίση $(-1/R'_L)$ και διέρχεται από το σημείο λειτουργίας (Q):

$$i_D = -\frac{1}{R'_L} v_{DS} + \frac{V_{DS}}{R'_L} + I_D$$



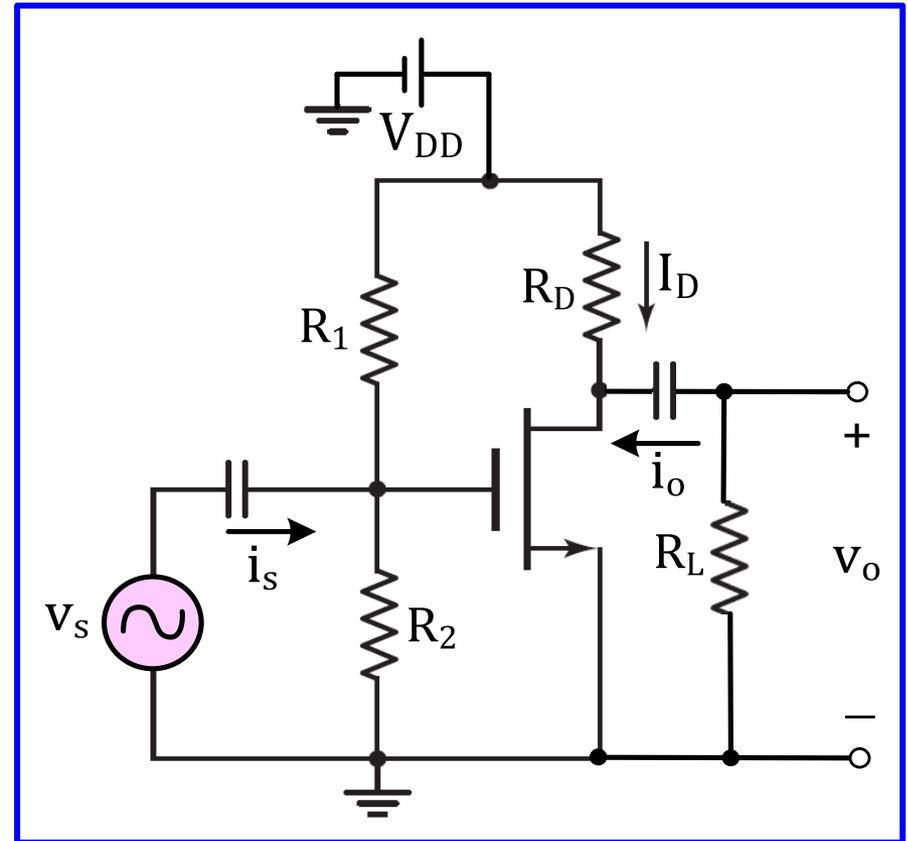
$$i_D = 0 \Rightarrow v_{DS_{\max}} = V_{DS} + I_D R'_L$$

$$v_{DS} = 0 \Rightarrow i_{D_{\max}} = I_D + \frac{V_{DS}}{R'_L}$$



Παράδειγμα 7^ο: γραμμές φορτίου (dc, ac)

Για τον ενισχυτή κοινής πηγής του σχήματος δίνονται: $V_{DD} = 12\text{ V}$, αντίσταση εισόδου $R_i = 100\text{ k}\Omega$ και $R_L = 10\text{ k}\Omega$. Θα υπολογίσουμε τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος (R_1 , R_2 , R_D), έτσι ώστε το ρεύμα λειτουργίας του nMOS να είναι $I_D = 2\text{ mA}$ και το σημείο λειτουργίας του nMOS να βρίσκεται στο μέσο της περιοχής κόρου. Κατόπιν, θα σχεδιάσουμε στους ίδιους άξονες τις γραμμές φορτίου του ενισχυτή στο συνεχές και στο εναλλασσόμενο. Με δεδομένο ότι η τάση εισόδου v_s είναι ημιτονικό σήμα με πλάτος 354 mV , θα διερευνήσουμε εάν η τάση εξόδου υφίσταται ψαλιδισμό, λόγω της εξόδου του nMOS από την περιοχή κόρου. Για το nMOS δίνονται: $\beta = 2\text{ mA/V}^2$, $V_T = 1\text{ V}$.



Παράδειγμα 7^ο: γραμμές φορτίου (dc, ac)

Η χωροθέτηση του σημείου λειτουργίας του MOSFET στο μέσο της περιοχής κόρου, επιτρέπει την καλύτερη δυνατή συμμετρία της ταλάντωσης της τάσης εξόδου του ενισχυτή, διατηρώντας το MOSFET στην περιοχή κόρου.

Αφού το ρεύμα λειτουργίας του MOSFET είναι 2 mA, το ρεύμα υποδοχής του στο όριο της περιοχής κόρου με την ωμική περιοχή θα πρέπει να είναι $I_{Dsat} = 4 \text{ mA}$, έτσι ώστε το σημείο λειτουργίας να βρίσκεται στο μέσο της περιοχής κόρου. Υπολογίζουμε αρχικά τις τάσεις V_{GSsat} , V_{DSsat} στο όριο των 2 περιοχών λειτουργίας:

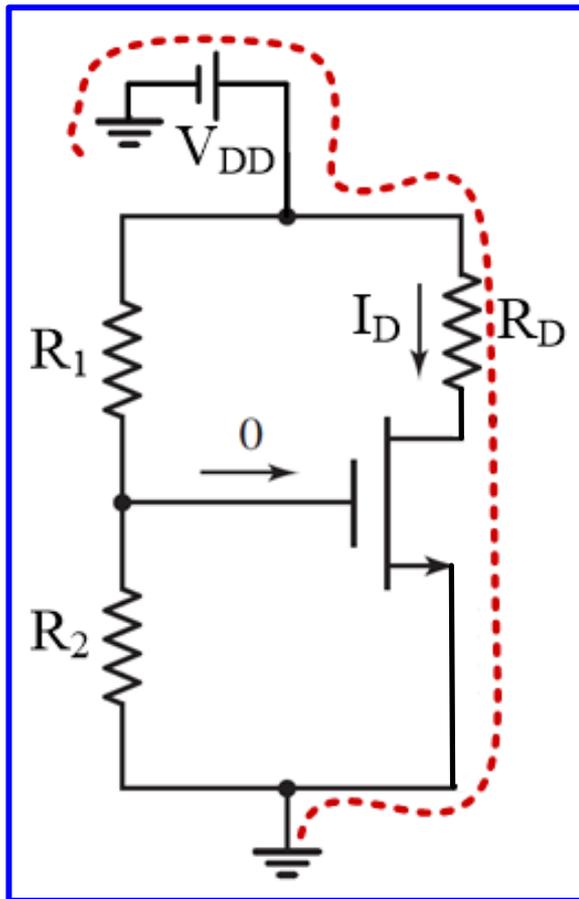
$$I_{Dsat} = \beta/2 (V_{GSsat} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GSsat} = \sqrt{\frac{2I_{Dsat}}{\beta}} + V_T \Rightarrow V_{GSsat} = 3 \text{ V}.$$

Στο όριο των δύο περιοχών ισχύει ότι: $V_{DSsat} = V_{GSsat} - V_T \Rightarrow V_{DSsat} = 2 \text{ V}$.

Αφού η τάση τροφοδοσίας (V_{DD}) είναι 12 V και αποτελεί την μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η τάση V_{DS} , για να βρίσκεται το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ στο μέσο της περιοχής κόρου, πρέπει $V_{DS} = (V_{DSsat} + V_{DD}) / 2 = [(2 + 12) / 2] \text{ V} = 7 \text{ V}$.

Καταλήγουμε λοιπόν, ότι οι συντεταγμένες του σημείου λειτουργίας του MOSFET, πρέπει να είναι: $Q(V_{DS}, I_{DS}) = (7 \text{ V}, 2 \text{ mA})$.

Παράδειγμα 7^ο: γραμμές φορτίου (dc, ac)



$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D \Rightarrow R_D = (V_{DD} - V_{DS}) / I_D$$
$$\Rightarrow R_D = 2,5 \text{ k}\Omega$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_D}{\beta}} + V_T$$
$$\Rightarrow V_{GS} = 2,41 \text{ V}$$

Αφού το ρεύμα πύλης είναι μηδενικό και γνωρίζοντας ότι $R_i = R_1 \parallel R_2$, συνεχίζουμε ως εξής:

$$V_{GS} = V_G = [R_2 / (R_1 + R_2)] V_{DD} \Rightarrow$$

$$R_2 / (R_1 + R_2) = V_{GS} / V_{DD} = 0,2 \Rightarrow$$

$$R_i = (1/R_1) R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 0,2 \Rightarrow$$

$$R_i / R_1 = 0,2 \Rightarrow R_1 = (100 / 0,2) \Omega \Rightarrow R_1 = 500 \Omega$$

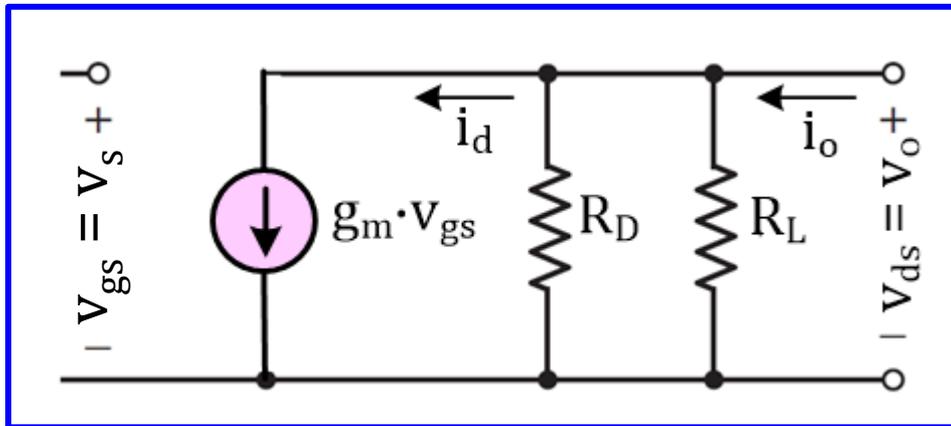
$$R_2 / (R_1 + R_2) = 0,2 \Rightarrow R_2 = 125 \text{ k}\Omega$$

Παράδειγμα 7^ο: γραμμές φορτίου (dc, ac)

2^{ος} κανόνας Kirchhoff στον βρόχο εξόδου για το **συνεχές**:

$$\begin{aligned} -V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} &= 0 \\ V_{DS} = 0 &\Rightarrow I_{Dmax} = V_{DD} / R_D = 4,8 \text{ mA} \\ I_D = 0 &\Rightarrow V_{DSmax} = V_{DD} = 12 \text{ V} \end{aligned}$$

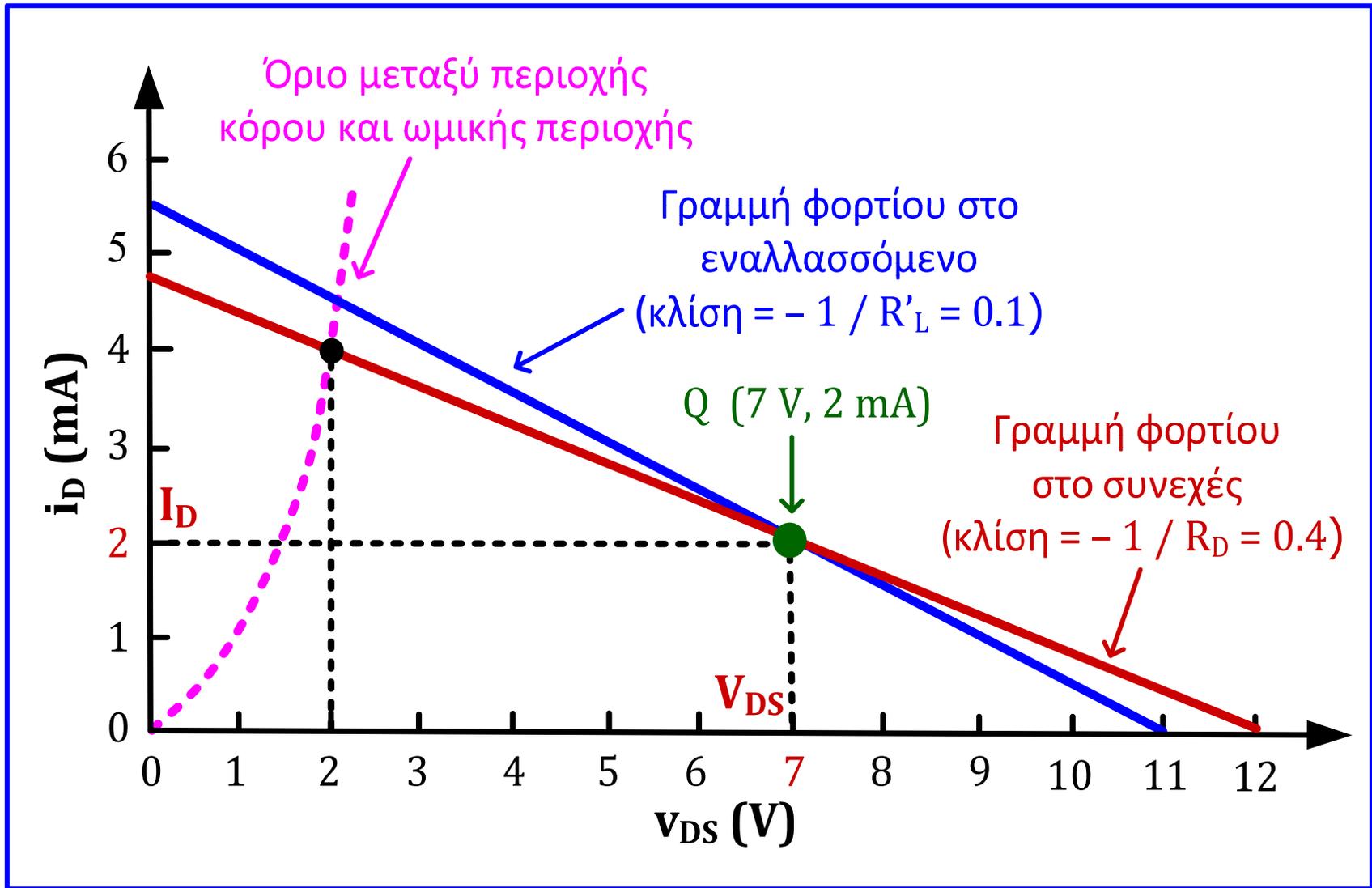
2^{ος} κανόνας Kirchhoff στον βρόχο εξόδου για το **εναλλασσόμενο**:



$$R'_L = R_D \parallel R_L = 2 \text{ k}\Omega$$

$$\begin{aligned} v_o = v_{ds} &= -i_d R'_L \Rightarrow \\ v_{DS} - V_{DS} &= -(i_D - I_D) R'_L \\ v_{DS} = 0 &\Rightarrow \\ i_{Dmax} &= I_D + V_{DS} / R'_L = 5,5 \text{ mA} \\ i_D = 0 &\Rightarrow \\ v_{DSmax} &= V_{DS} + I_D R'_L = 11 \text{ V} \end{aligned}$$

Παράδειγμα 7^ο: γραμμές φορτίου (dc, ac)



Παράδειγμα 7^ο: γραμμές φορτίου (dc, ac)

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο υπολογίζουμε την ενίσχυση τάσης του ενισχυτή:

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 2,83 \text{ mS}$$

$$v_o = -g_m R'_L v_{gs} = -g_m R'_L v_i \Rightarrow A_{vs} = v_o / v_s = -g_m R'_L \Rightarrow A_{vs} = -5,65$$

Εάν η τάση εισόδου v_s είναι ημιτονικό σήμα με πλάτος 354 mV, τότε η τάση εξόδου είναι ημιτονικό σήμα ίδιας συχνότητας με πλάτος:

$$(\text{Πλάτος } v_o) = A_{vs} \cdot (\text{Πλάτος } v_s) = 5,65 \cdot 354 \text{ mV} = 2000 \text{ mV} = 2 \text{ V}$$

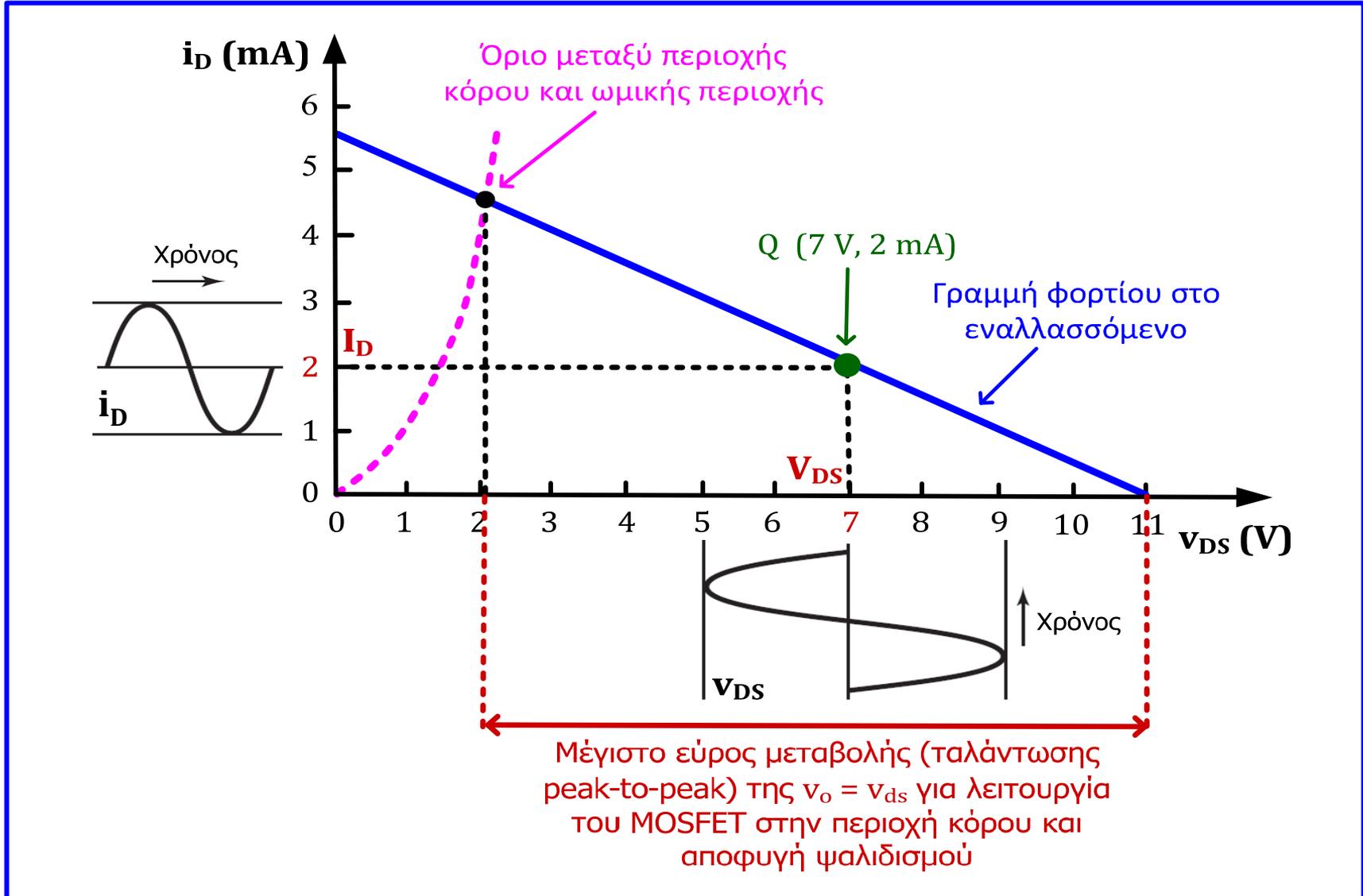
Όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα της επόμενης σελίδας, η τάση εξόδου του ενισχυτή δεν υφίσταται ψαλιδισμό, αφού το nMOS διατηρείται στην περιοχή κόρου, όταν η τάση εξόδου λαμβάνει την μέγιστη θετική και την μέγιστη αρνητική τιμή της.

Τα όρια της μεταβολής της τάσης εξόδου, εντός των οποίων το nMOS διατηρείται στην περιοχή κόρου είναι τα εξής:

$$\text{Όριο μεταβολής θετικής τάσης εξόδου: } V_{DS} - V_{DSsat} \cong (7 - 2) \text{ V} = 5 \text{ V}$$

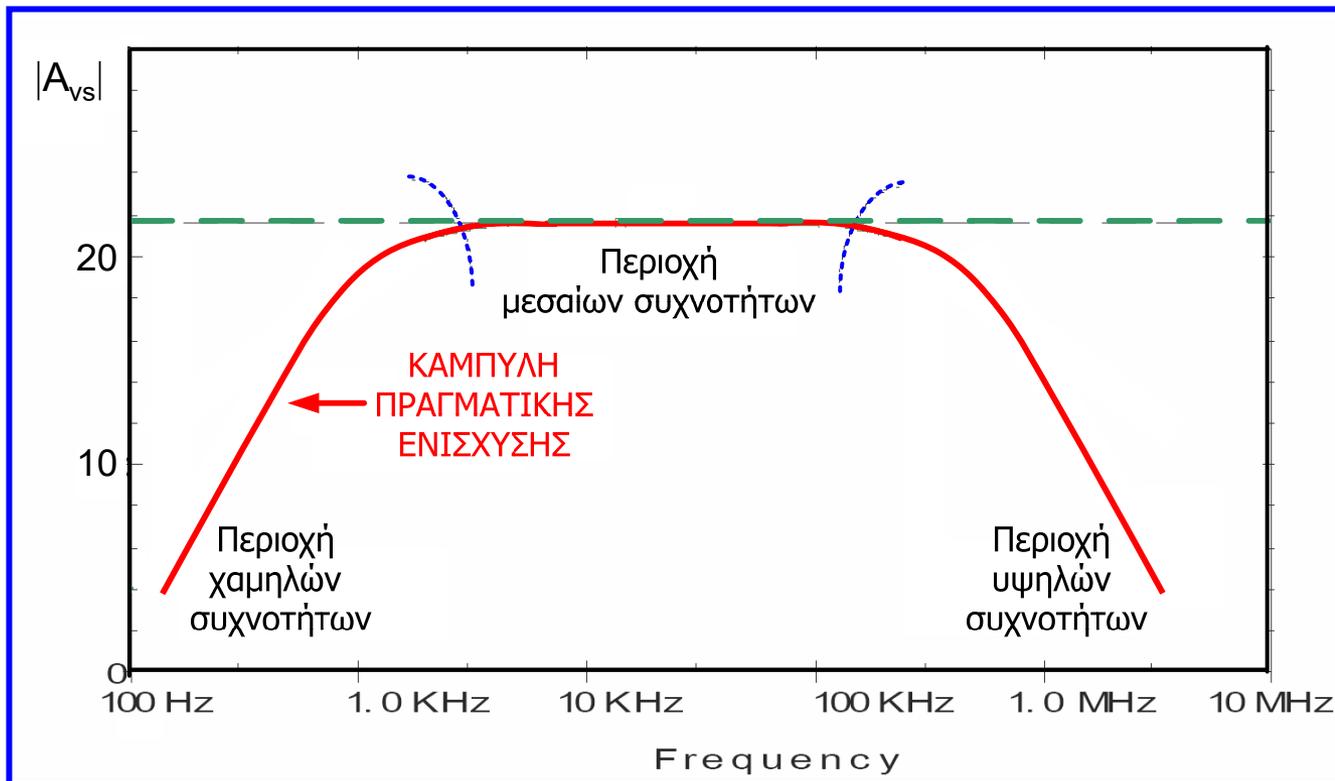
$$\text{Όριο μεταβολής αρνητικής τάσης εξόδου: } I_D R'_L = 4 \text{ V}$$

Παράδειγμα 7^ο: γραμμές φορτίου (dc, ac)



Εισαγωγή στην απόκριση συχνότητας ενισχυτών

- Οι ενισχύσεις που υπολογίσαμε ήταν σταθερές, κάτι που όμως δεν συμβαίνει στην πράξη όπου οι ενισχύσεις μεταβάλλονται ανάλογα με τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου σήματος εισόδου.
- Η καμπύλη του μέτρου της ενίσχυσης συνάρτησε της συχνότητας αναφέρεται ως **απόκριση συχνότητας μέτρου** ενός ενισχυτή.



Εισαγωγή στην απόκριση συχνότητας ενισχυτών

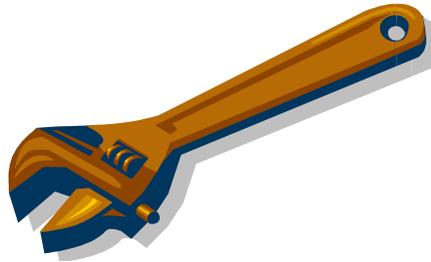
- Η τιμή του μέτρου ενίσχυσης που υπολογίσαμε μέχρι τώρα ισχύει μόνο στην **περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων**, όπου ο ενισχυτής παρουσιάζει **ωμική συμπεριφορά**.
- Τα **ισοδύναμα μοντέλα μικρού σήματος** του διπολικού τρανζίστορ και του MOSFET περιγράφουν τη λειτουργία των τρανζίστορ μόνο στην περιοχή των χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων.
- Η απόκλιση που εμφανίζεται στην **περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων** οφείλεται στο ότι για τον προσδιορισμό του ισοδύναμου κυκλώματος του ενισχυτή θεωρήσαμε τους **πυκνωτές** των ενισχυτών ως βραχυκυκλώματα, κάτι που δεν είναι ακριβές στην περιοχή αυτή.
- Η συμπεριφορά του ενισχυτή στην **περιοχή των υψηλών συχνοτήτων** οφείλεται στις **εσωτερικές παρασιτικές χωρητικότητες των επαφών ή περιοχών των τρανζίστορ**, οι οποίες περιορίζουν την ενίσχυση στις υψηλές συχνότητες.
- Η **απόκριση συχνότητας των ενισχυτών** αποτελεί το αντικείμενο της **4ης ενότητας**.

Συμπεράσματα

- Το τρανζίστορ **MOSFET** όταν λειτουργεί στην περιοχή κόρου, παρουσιάζει ηλεκτρική συμπεριφορά **ελεγχόμενης πηγής ρεύματος**, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για την υλοποίηση ενισχυτών.
- Αναλύθηκαν **ενισχυτές απλής βαθμίδας**, δηλαδή ενισχυτές στους οποίους συμμετέχει ως **ενεργό στοιχείο ένα MOSFET**.
- Η χρήση των **MOSFET** έχει επικρατήσει στη σχεδίαση ενισχυτών που υλοποιούνται σε **ολοκληρωμένα κυκλώματα (integrated circuits, ICs)**.
- Αυτό οφείλεται στο ότι τα **MOSFET** απαιτούν **μικρότερη επιφάνεια πυριτίου**, είναι πιο **εύκολο να κατασκευαστούν σε IC** και **καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια**.
- Έχουν αναπτυχθεί τεχνικές σχεδίασης με τη χρήση των οποίων **οι ενισχυτές υλοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά με MOSFET** και πολύ μικρό πλήθος αντιστάσεων (οι οποίες απαιτούν μεγαλύτερη επιφάνεια στο ολοκληρωμένο κύκλωμα και καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια).
- Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν την **αντικατάσταση των αντιστάσεων με MOSFET** και την **πόλωση των MOSFET στους ενισχυτές με καθρέπτες ρεύματος**.

Συμπεράσματα

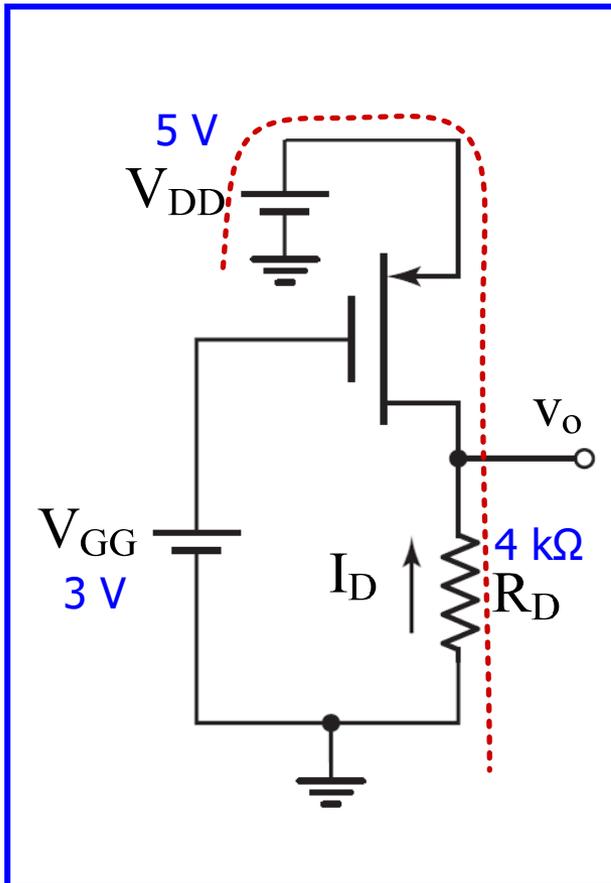
- Στους ενισχυτές, η ροή ρεύματος στο MOSFET επιτυγχάνεται μέσω **πηγής συνεχούς τάσης (τροφοδοσία)**, ενώ οι **αντιστάσεις** ή άλλα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την πόλωση του MOSFET, καθορίζουν τις τιμές ρευμάτων και τάσεων συνεχούς και την επιθυμητή ενίσχυση.
- Το MOSFET, όταν το σημείο λειτουργίας του βρίσκεται στην **περιοχή** κόρου των χαρακτηριστικών του, λειτουργεί ως ενισχυτής με τρεις τρόπους σύνδεσης (**κοινής πηγής, κοινής πύλης και κοινής υποδοχής**).
- Η **σύνδεση κοινής πηγής** είναι η μόνη που παρέχει **ενίσχυση τάσης και ενίσχυση ρεύματος**.
- Ο **προσδιορισμός του σημείου λειτουργίας** γίνεται με ανάλυση του κυκλώματος ενός ενισχυτή στο συνεχές.
- Η **μελέτη ενισχυτών στο εναλλασσόμενο** γίνεται με χρήση **ισοδύναμων μοντέλων μικρού σήματος** του MOSFET και ισχύει μόνο για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων.



Ασκήσεις 3^{ης} ενότητας

Άσκηση 1^η

Για το τρανζίστορ **pMOS** του παρακάτω ενισχυτή δίνονται: $\beta = 0.6 \text{ mA/V}^2$, $V_T = -0.5 \text{ V}$. Θα προσδιορίσουμε το σημείο λειτουργίας του και θα σχεδιάσουμε την γραμμή φορτίου του ενισχυτή στο συνεχές.



Τάσεις και ρεύματα του pMOS: αρνητικές τιμές
Συμβατική φορά του I_D : από υποδοχή προς πηγή

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_{GG} - V_{DD} = (3 - 5) \text{ V} = -2 \text{ V}$$

Υποθέτουμε ότι το pMOS
λειτουργεί στην περιοχή κόρου:

$$I_D = -\beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 = -0,675 \text{ mA}$$

$$-V_{DD} + V_{SD} - I_D R_D = 0 \Rightarrow V_{SD} = V_{DD} + I_D R_D$$

$$\Rightarrow V_{DS} = -V_{DD} - I_D R_D = -2,3 \text{ V}$$

$$V_{DS} < V_{GS} - V_T, \text{ αφού } -2,3 \text{ V} < (-1 + 0,5) \text{ V}$$

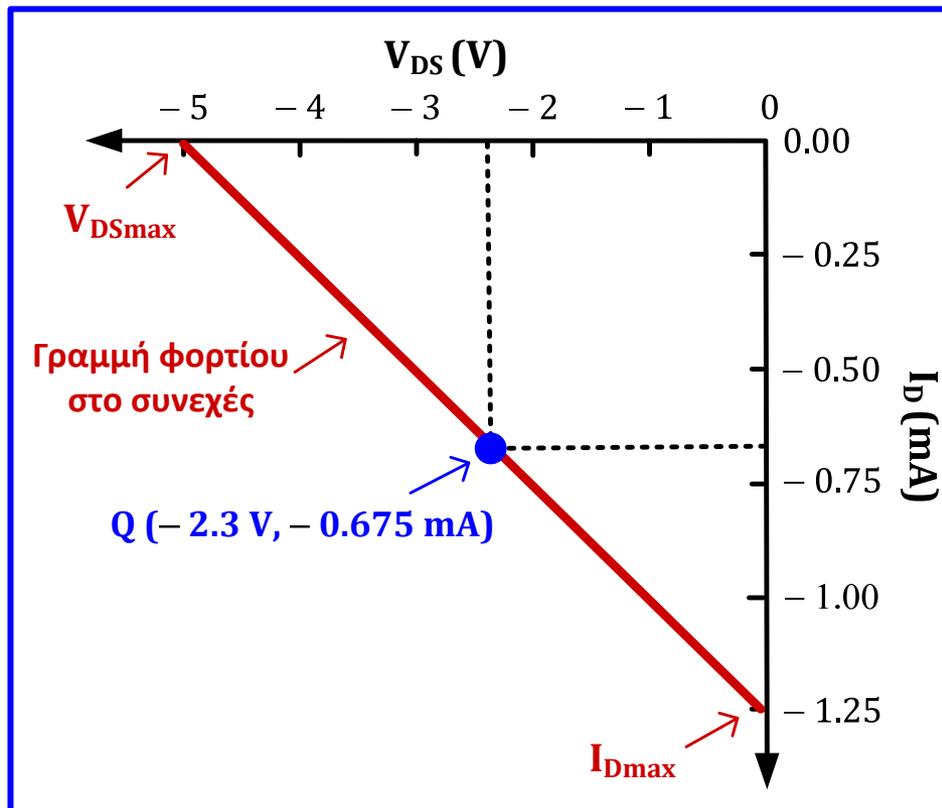
\Rightarrow επιβεβαίωση ότι το pMOS λειτουργεί στην
περιοχή κόρου

Άσκηση 1^η

$$-V_{DD} + V_{SD} - I_D R_D = 0 \Rightarrow -V_{DD} - V_{DS} - I_D R_D = 0$$

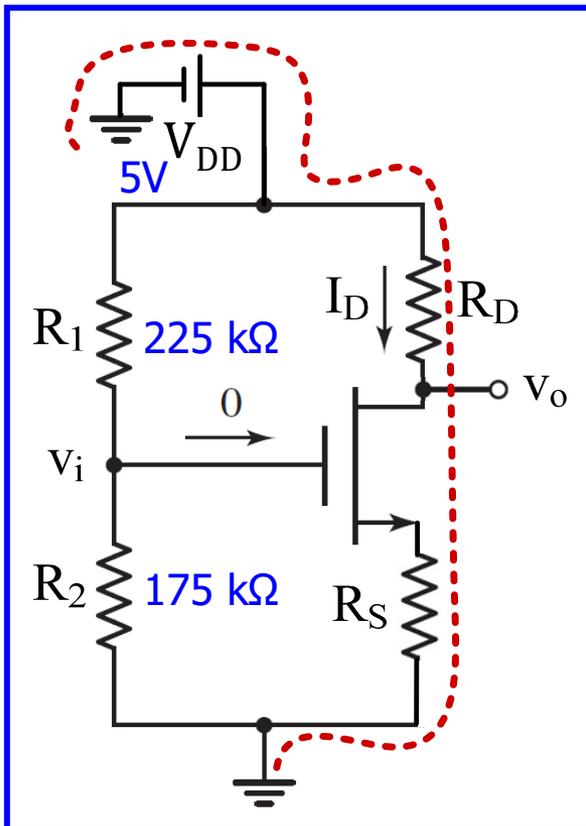
$$I_D = 0 \Rightarrow V_{DSmax} = -V_{DD} = -5 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 0 \Rightarrow I_{Dmax} = -V_{DD} / R_D = -1,25 \text{ mA}$$



Άσκηση 2^η

Για το τρανζίστορ **nMOS** του παρακάτω ενισχυτή δίνονται: $\beta = 2 \text{ mA/V}^2$, $V_T = 0,8 \text{ V}$. Θα υπολογίσουμε τις τιμές των αντιστάσεων R_D και R_S , έτσι ώστε το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ να είναι $Q(V_{DS}, I_D) = (2 \text{ V}, 0,6 \text{ mA})$ και θα σχεδιάσουμε την γραμμή φορτίου στο συνεχές του ενισχυτή.



$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} \Rightarrow V_G = 2,19 \text{ V}$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_D}{\beta}} + V_T$$

$$\Rightarrow V_{GS} = 1,57 \text{ V}, \quad V_{DS} > V_{GS} - V_T \text{ (περιοχή κόρου)}$$

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S \Rightarrow R_S = (V_G - V_{GS}) / I_D \Rightarrow R_S = 1 \text{ k}\Omega$$

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} + I_D R_S = 0$$

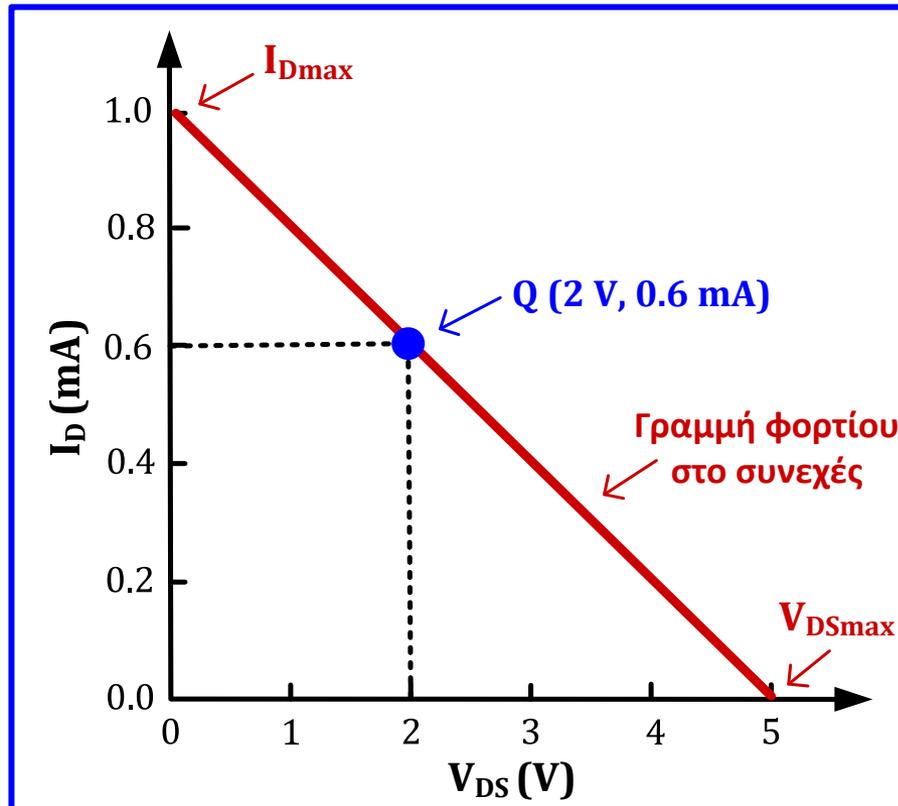
$$\Rightarrow R_D = (V_{DD} - V_{DS} - I_D R_S) / I_D \Rightarrow R_D = 4 \text{ k}\Omega$$

Άσκηση 2^η

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} + I_D R_S = 0$$

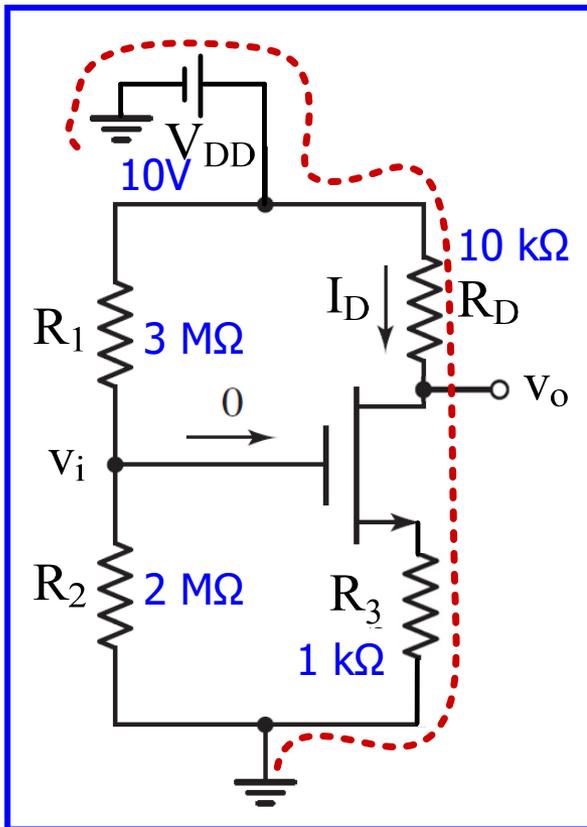
$$I_D = 0 \Rightarrow V_{DSmax} = V_{DD} = 5 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 0 \Rightarrow I_{Dmax} = V_{DD} / (R_D + R_S) = 1 \text{ mA}$$



Άσκηση 3^η

Για τον ενισχυτή κοινής πηγής του σχήματος θα προσδιορίσουμε το σημείο λειτουργίας $Q(V_{DS}, I_D)$ του τρανζίστορ **nMOS**. Δίνονται: $V_{GS} = 3,5 \text{ V}$, $V_T = 0,75 \text{ V}$.



$$V_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} - I_D R_3 \Rightarrow$$

$$I_D = \frac{1}{R_3} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} - V_{GS} \right) \Rightarrow I_D = 0.5 \text{ mA}$$

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} + I_D R_3 = 0 \Rightarrow V_{DS} = 4.5 \text{ V}$$

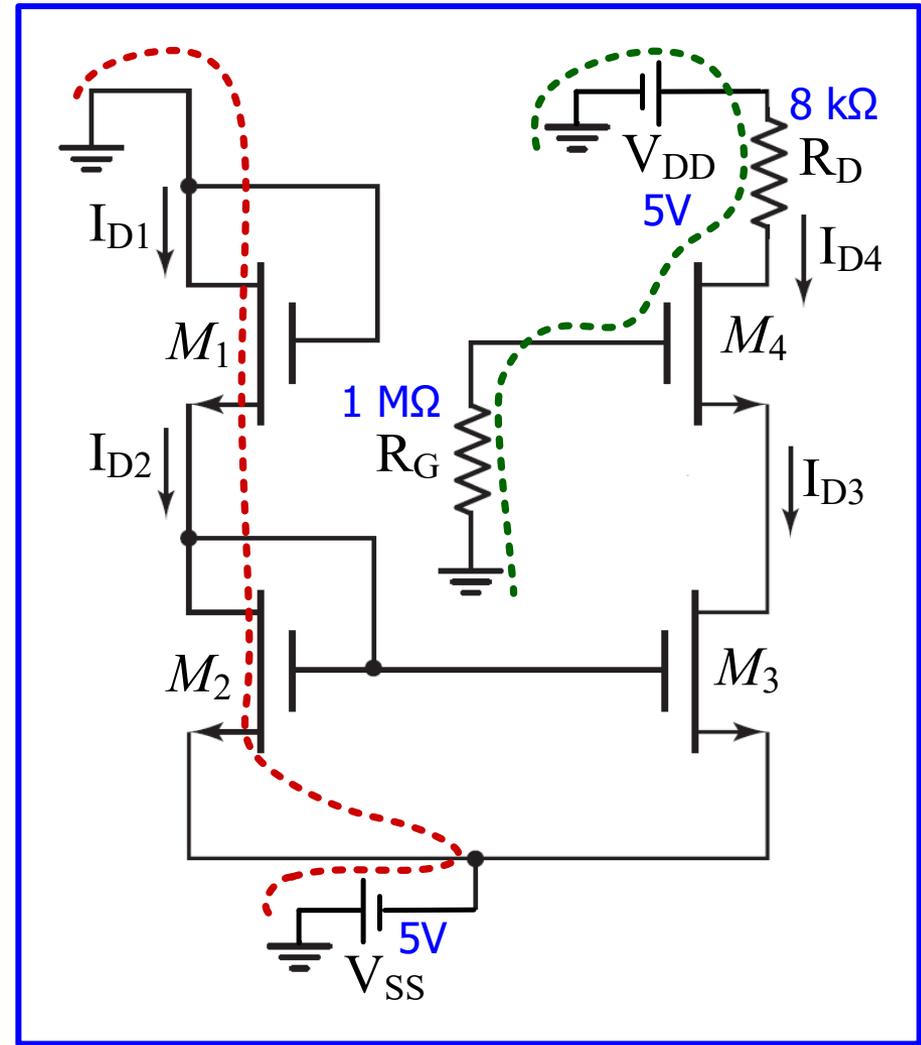
Σημείο λειτουργίας: $Q(4,5 \text{ V}, 0,5 \text{ mA})$

$$V_{DS} = 4,5 > V_{GS} - V_T = 3,5 - 0,75 = 2,75$$

Επομένως, το MOSFET λειτουργεί στην περιοχή κόρου

Άσκηση 4η

Το τρανζίστορ **nMOS** M_4 του ενισχυτή του διπλανού σχήματος, πολώνεται με μια πηγή σταθερού ρεύματος, η οποία έχει υλοποιηθεί με 3 τρανζίστορ **nMOS** (M_1, M_2, M_3). Θα υπολογίσουμε το ρεύμα πόλωσης (I_{D3}) που παρέχει στον ενισχυτή η πηγή ρεύματος και στη συνέχεια θα προσδιορίσουμε το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ **nMOS** (M_4) του ενισχυτή. Τα τρανζίστορ της πηγής ρεύματος και του ενισχυτή είναι όμοια με $\beta = 0,3 \text{ mA/V}^2$, $V_T = 0,5 \text{ V}$.



Άσκηση 4η

$$M_1, M_2, M_3 \text{ όμοια} \Rightarrow \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta$$
$$V_{T1} = V_{T2} = V_{T3} = V_T$$

Τα M_1, M_2 λειτουργούν στην περιοχή κόρου, αφού

$$V_G = V_D \Rightarrow V_{GS} = V_{DS} \Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

$$I_{D1} = I_{D2} \Rightarrow \beta/2 (V_{GS1} - V_T)^2 = \beta/2 (V_{GS2} - V_T)^2$$

$$\Rightarrow V_{GS1} - V_T = V_{GS2} - V_T \Rightarrow V_{GS1} = V_{GS2}$$

$$V_{DS1} + V_{DS2} - V_{SS} = 0 \Rightarrow V_{GS1} + V_{GS2} - V_{SS} = 0$$

$$\Rightarrow 2V_{GS2} - V_{SS} = 0 \Rightarrow V_{GS2} = V_{SS}/2$$

$$V_{GS3} = V_{GS2} \Rightarrow V_{GS3} = V_{SS}/2$$

$$I_{D3} = \beta/2 (V_{GS3} - V_T)^2 \Rightarrow$$

$$I_{D3} = \beta/2 (V_{SS}/2 - V_T)^2 = \mathbf{0,6 \text{ mA}}$$

Άσκηση 4η

$$I_{D3} = I_{D4} \Rightarrow I_{D4} = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_{D4}}{\beta}} + V_T = 2,5 \text{ V}$$

$$V_{DG} + V_{GS} + V_{SD} = 0 \Rightarrow V_{DG} = V_{DS} - V_{GS}$$

$$-V_{DD} + V_{DG} + I_{D4}R_D = 0 \Rightarrow -V_{DD} + V_{DS} - V_{GS} + I_{D4}R_D = 0$$

$$\Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_{D4}R_D + V_{GS} = 2,7 \text{ V}$$

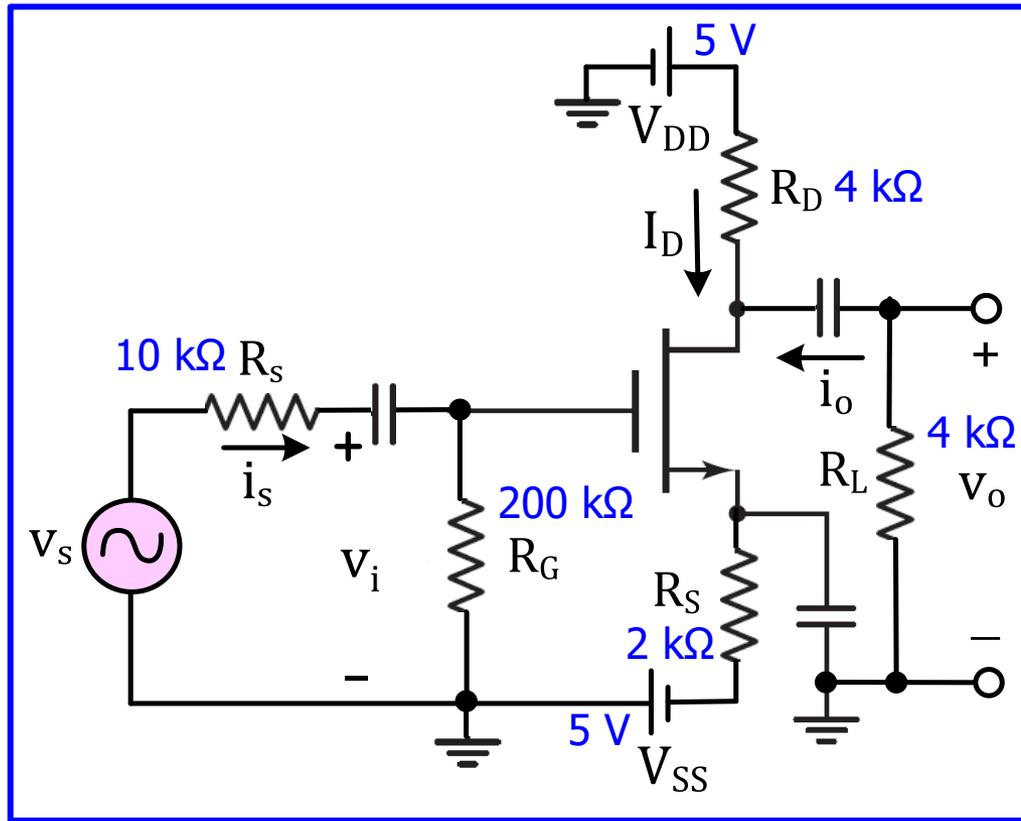
$$Q_4(2,7 \text{ V}, 0,6 \text{ mA})$$

Για τον προσδιορισμό του Q_4 υποθέσαμε ότι το M_4 λειτουργεί στην περιοχή κόρου. Επαληθεύουμε την υπόθεση:

$$V_{DS} = 2,7 \text{ V} > V_{GS} - V_T = (2,5 - 0,5) \text{ V} = 2 \text{ V}$$

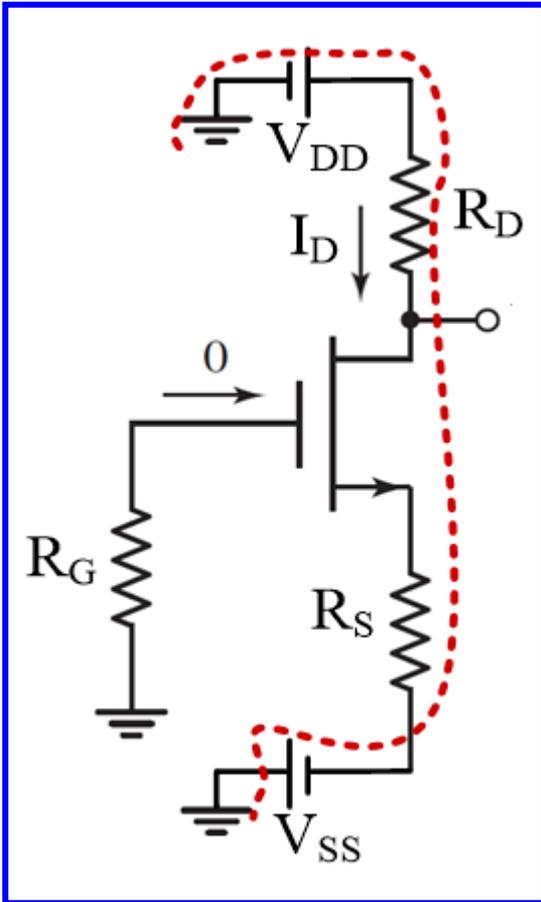
Άσκηση 5η

Για τον ενισχυτή κοινής πηγής του παρακάτω σχήματος, αφού αποδείξουμε ότι το τρανζίστορ nMOS λειτουργεί στην περιοχή κόρου, θα υπολογίσουμε την ενίσχυση τάσης A_{vs} . Για το τρανζίστορ nMOS δίνονται: $\beta = 0,5 \text{ mA} / \text{V}^2$, $V_T = 0,5 \text{ V}$.



Άσκηση 5η

Για να αποδείξουμε ότι το MOSFET λειτουργεί στην περιοχή κόρου, πρέπει να δείξουμε ότι ισχύει η συνθήκη: $V_{DS} > V_{GS} - V_T$.



$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - (I_D R_S - V_{SS}) \Rightarrow V_{GS} = V_{SS} - I_D R_S$$

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} + I_D R_S - V_{SS} = 0$$

$$\Rightarrow V_{DS} = V_{DD} + V_{SS} - I_D (R_D + R_S)$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow I_D = \beta/2 (V_{SS} - I_D R_S - V_T)^2 \Rightarrow$$

$$R_S^2 I_D^2 - 2[(V_{SS} - V_T)R_S + 1/\beta]I_D + (V_{SS} - V_T)^2 = 0 \Rightarrow$$

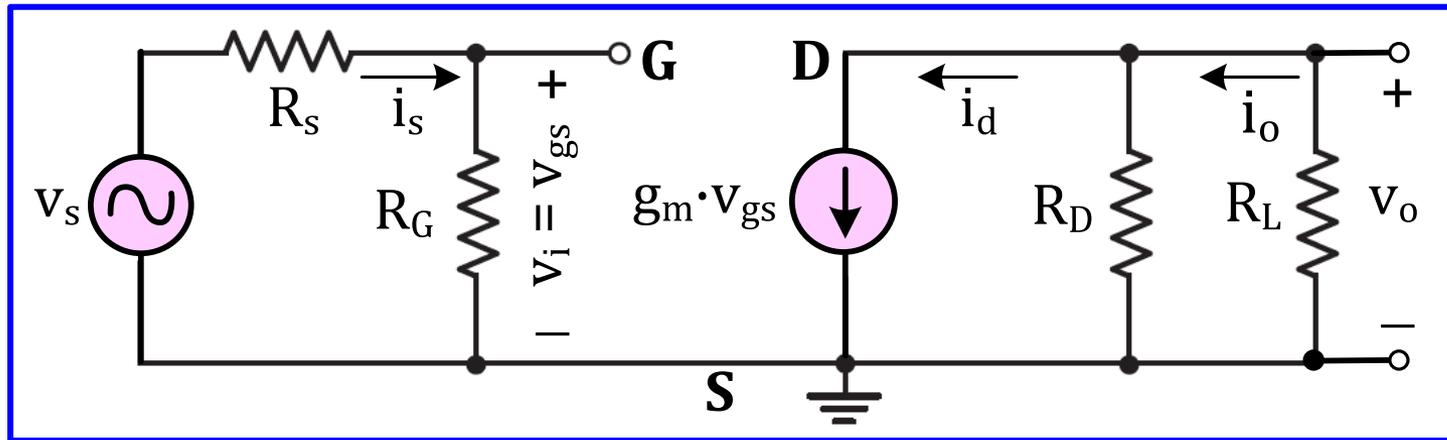
$$4I_D^2 - 22I_D + 20,25 = 0$$

Λύσεις εξίσωσης: $I_D = 0,92 \text{ mA}, 4,32 \text{ mA}$.

$I_D = 0,92 \text{ mA}$: $V_{DS} = 3 \text{ V}, V_{GS} = 2,66 \text{ V} \Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_T$

$I_D = 4,32 \text{ mA}$: $V_{GS} < 0$ το pMOS δεν άγει, θα έπρεπε $I_D = 0$

Άσκηση 5η



$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 959 \mu\text{S}$$

$$R'_L = R_D \parallel R_L = 2 \text{ k}\Omega$$

$$V_o = -g_m V_i R'_L$$

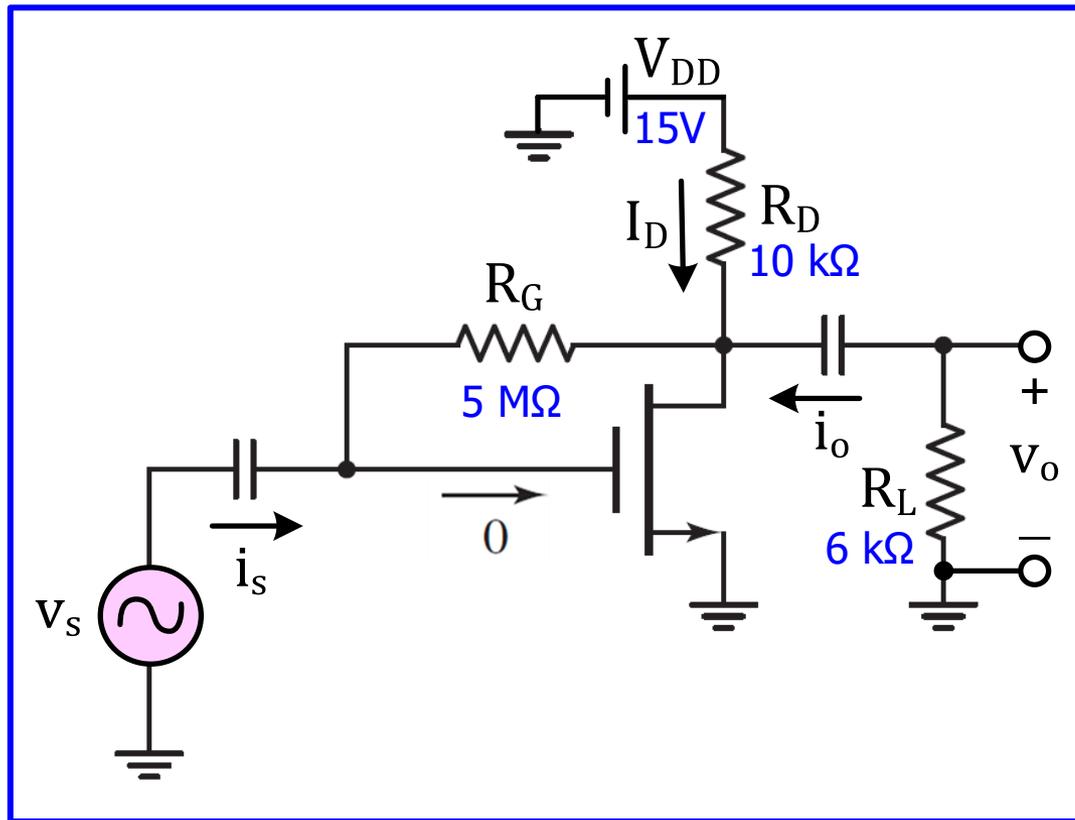
$$V_i = \frac{R_G}{R_s + R_G} V_s$$

$$V_o = -g_m \frac{R_G}{R_s + R_G} V_s R'_L$$

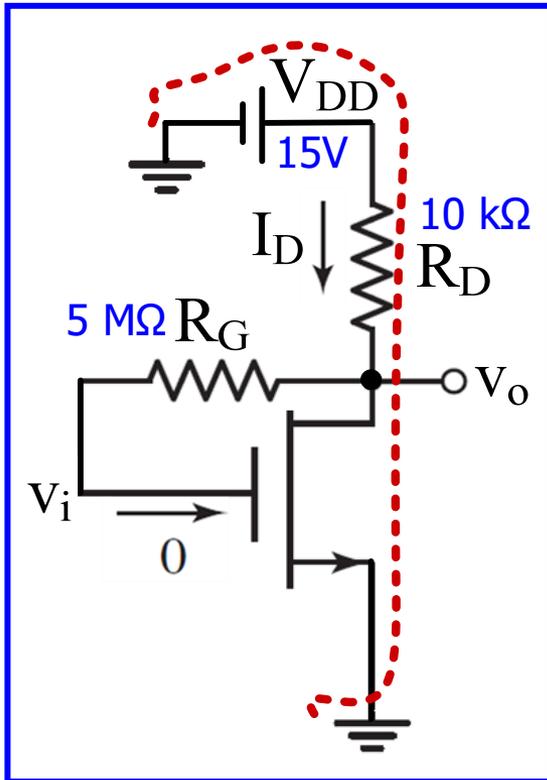
$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = -g_m \frac{R_G}{R_s + R_G} R'_L = -1,82$$

Άσκηση 6η

Για τον ενισχυτή κοινής πηγής του παρακάτω σχήματος, θα προσδιορίσουμε το σημείο λειτουργίας, την ενίσχυση τάσης A_{vs} , την αντίσταση εισόδου και την αντίσταση εξόδου. Για το τρανζίστορ nMOS δίνονται: $\beta = 0,3 \text{ mA/V}^2$, $V_T = 1,8 \text{ V}$.



Άσκηση 6η



$$V_{GS} = V_G - V_S = V_D - 0 = V_D \Rightarrow V_{GS} = V_{DS}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = V_D - 0 = V_D$$

Αφού $V_{GS} = V_{DS} \Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_T \Rightarrow$ περιοχή κόρου

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow I_D = \beta/2 (V_{DS} - V_T)^2$$

$$\Rightarrow I_D = \beta/2 (V_{DD} - I_D R_D - V_T)^2 \Rightarrow$$

$$R_D^2 I_D^2 - 2[(V_{DD} - V_T)R_D + 1/\beta]I_D + (V_{DD} - V_T)^2 = 0$$

$$100I_D^2 - 270,66I_D + 174,24 = 0$$

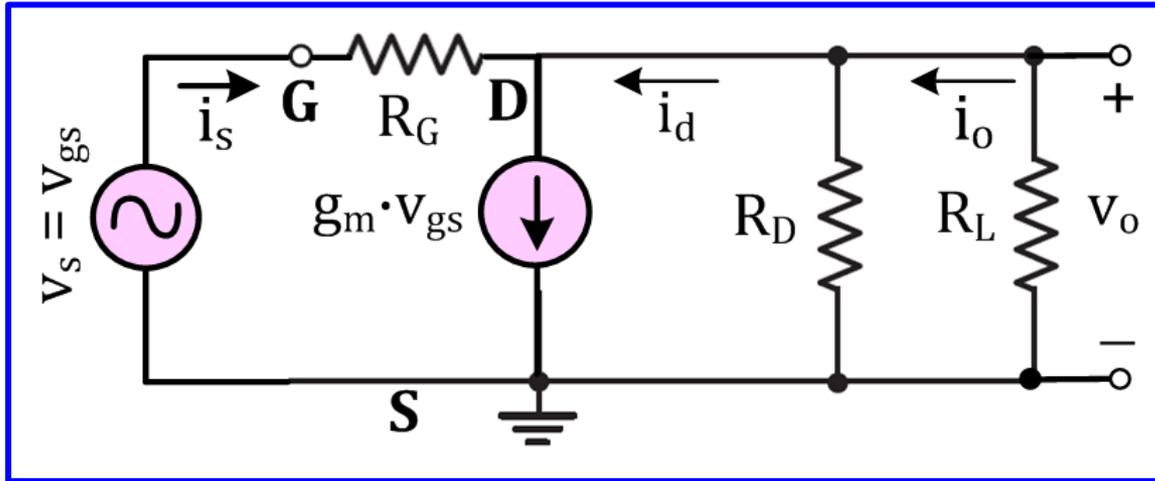
Λύσεις εξίσωσης β' βαθμού: $I_D = 1,05 \text{ mA}, 1,65 \text{ mA}$.

$$I_D = 1,05 \text{ mA}: V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = (15 - 1,05 \cdot 10) \text{ V} = 4,5 \text{ V}$$

$I_D = 1,65 \text{ mA}: V_{GS} < 0$ το nMOS δεν άγει και θα έπρεπε $I_D = 0$

Σημείο λειτουργίας: $Q(V_{DS}, I_D) = (4,5 \text{ V}, 1,05 \text{ mA})$.

Άσκηση 6η



Αγνοούμε το ρεύμα που διαρρέει την R_G , καθώς η τιμή της είναι πολύ μεγάλη (5 MΩ):

$$v_o = -g_m v_{gs} R'_L = -g_m v_s R'_L \Rightarrow$$

$$A_{vs} = v_o / v_s = -g_m R'_L = -2,98$$

$$i_s = \frac{(v_s - v_o)}{R_G} = \frac{v_s}{R_G} \cdot \left(1 - \frac{v_o}{v_s}\right) = \frac{v_s}{R_G} \cdot (1 - A_{vs})$$

$$g_m = \sqrt{2 \beta I_D} = 794 \mu S$$

$$R'_L = R_D \parallel R_L = 3,75 \text{ k}\Omega$$

Αντίσταση εξόδου
(για $v_s = 0$, $R_L = \infty$):

$$R_o = v_o / i_o = R_D = 10 \text{ k}\Omega$$

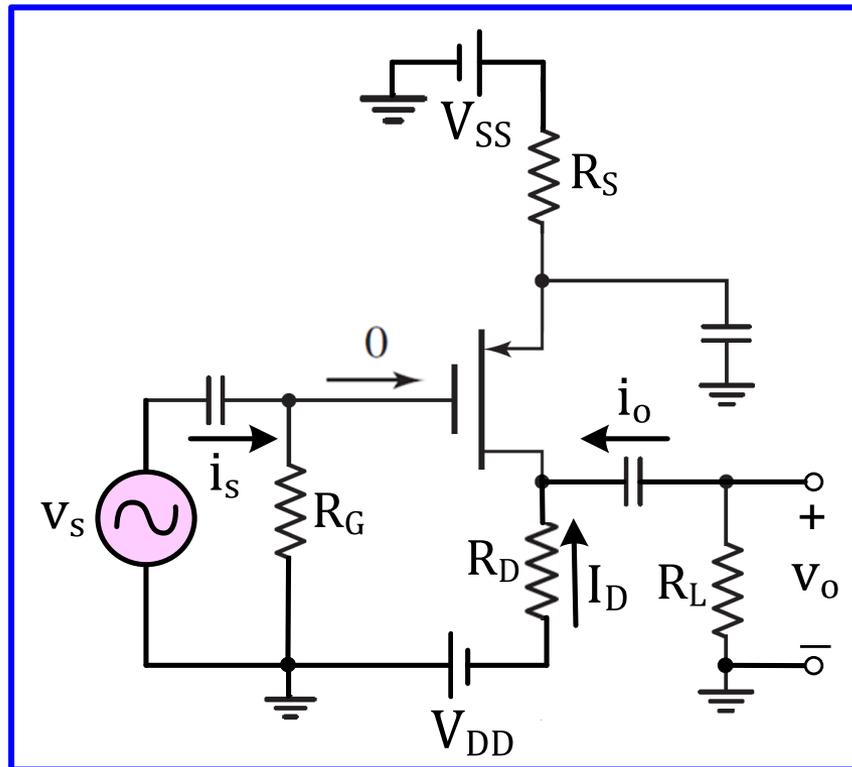
Αντίσταση εισόδου:

$$R_i = v_s / i_s \Rightarrow$$

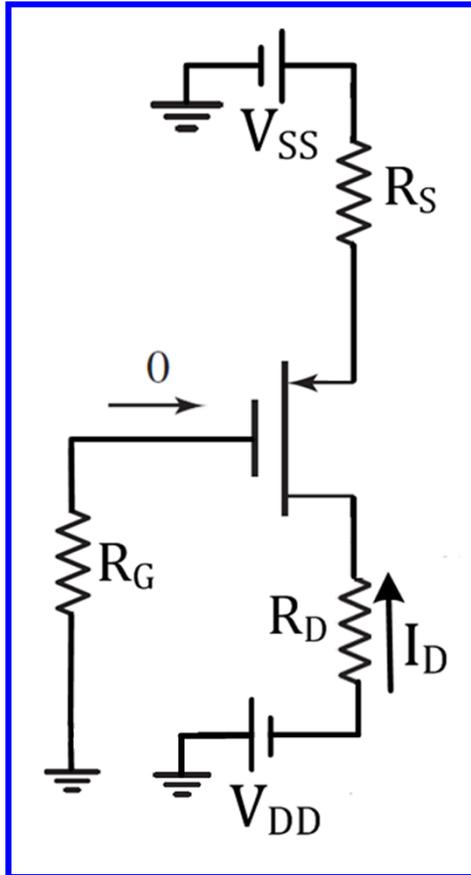
$$R_i = R_G / (1 - A_{vs}) = 1,25 \text{ M}\Omega$$

Άσκηση 7η

Για τον ενισχυτή κοινής πηγής του σχήματος που περιλαμβάνει τρανζίστορ **pMOS**, δίνονται: $V_{SS} = V_{DD} = 3\text{ V}$, $R_G = 100\text{ k}\Omega$, $R_L = 50\text{ k}\Omega$. Θα υπολογίσουμε τα υπόλοιπα στοιχεία του ενισχυτή (R_S , R_D), έτσι ώστε το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ να είναι $Q(V_{DS}, I_D) = (-1,5\text{ V}, -0,25\text{ mA})$. Κατόπιν, θα υπολογίσουμε την ενίσχυση ρεύματος A_{iL} . Για το τρανζίστορ pMOS δίνονται: $\beta = 1,6\text{ mA/V}^2$, $V_T = -0,5\text{ V}$.



Άσκηση 7η



$$I_D = -\beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS} = -\sqrt{\frac{2I_D}{\beta}} + V_T \Rightarrow$$

$$V_{GS} = (-0,56 - 0,5) \text{ V} = -1,06 \text{ V}, \quad V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

Αφού το ρεύμα πύλης είναι μηδενικό, η V_G συνδέεται στην γείωση μέσω της R_G . Επομένως:

$$V_{GS} = V_G - V_S = -V_S \Rightarrow V_S = -V_{GS} = 1,06 \text{ V}$$

$$V_S = V_{SS} + I_D R_S \Rightarrow R_S = (V_S - V_{SS}) / I_D \Rightarrow$$

$$R_S = [(1,06 - 3) / (-0,25)] \text{ mA} \Rightarrow \mathbf{R_S = 7,76 \text{ k}\Omega}$$

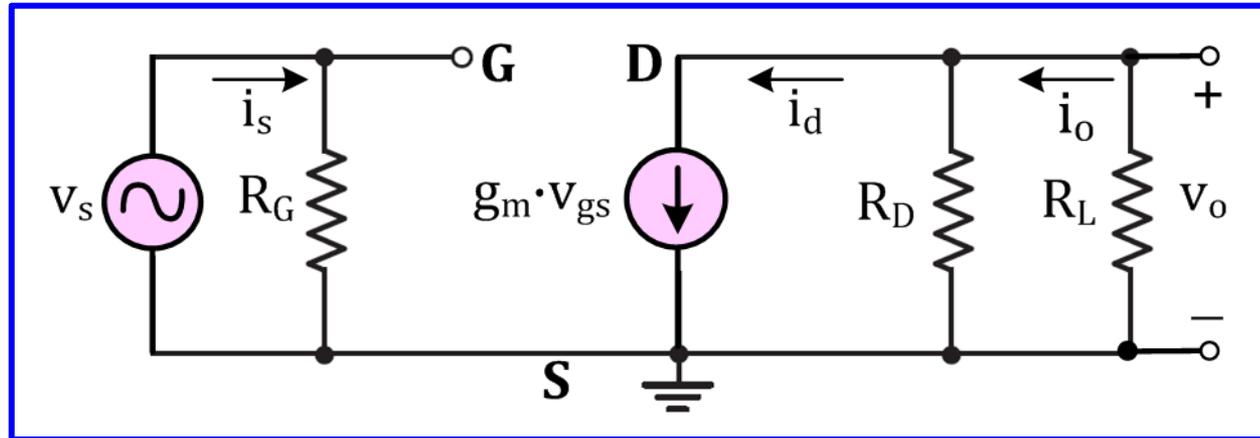
$$V_{DS} = V_D - V_S \Rightarrow V_D = V_{DS} + V_S$$

$$= (-1,5 + 1,06) \text{ V} = -0,44 \text{ V}$$

$$V_D = -I_D R_D - V_{DD} \Rightarrow R_D = (-V_D - V_{DD}) / I_D \Rightarrow$$

$$R_D = [(0,44 - 3) / (-0,25)] \text{ mA} \Rightarrow \mathbf{R_D = 10,24 \text{ k}\Omega}$$

Άσκηση 7η



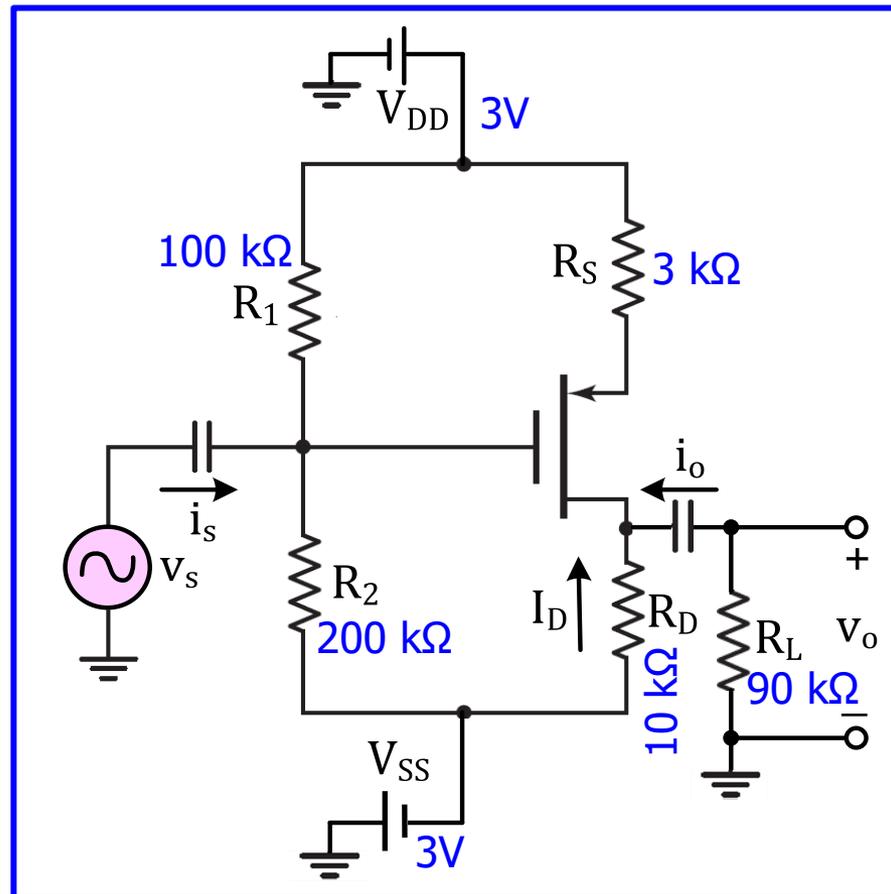
$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 894 \mu\text{S}$$

$$i_o = [R_D / (R_D + R_L)] g_m v_{gs} \Rightarrow i_o = [R_D / (R_D + R_L)] g_m R_G i_s \Rightarrow$$

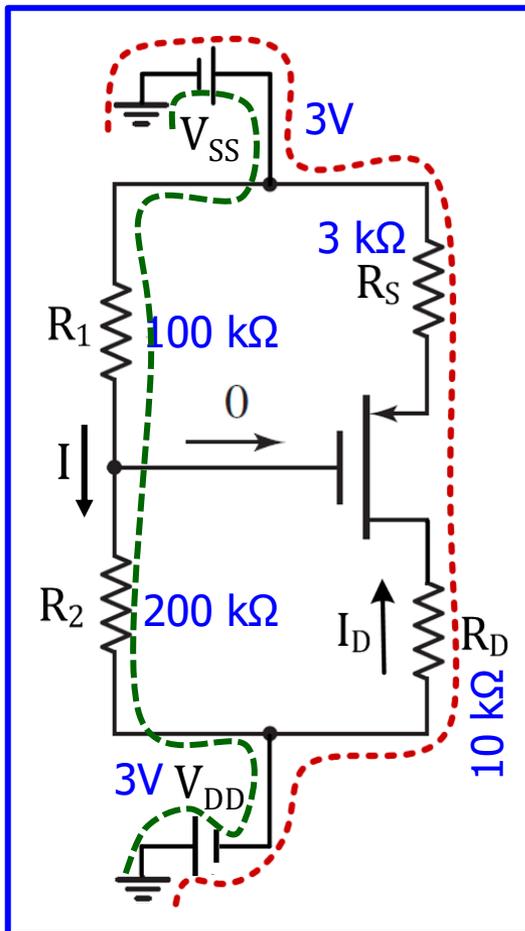
$$A_{iL} = i_o / i_s = [R_D / (R_D + R_L)] g_m R_G \Rightarrow A_{iL} = 18,23$$

Άσκηση 8η

Για τον ενισχυτή κοινής πηγής του παρακάτω σχήματος που περιλαμβάνει τρανζίστορ pMOS, θα προσδιορίσουμε το σημείο λειτουργίας και θα υπολογίσουμε την ενίσχυση τάσης A_{v_s} . Για το pMOS δίνονται: $\beta = 1,6 \text{ mA/V}^2$ και $V_T = -0,5 \text{ V}$.



Άσκηση 8η



$$I_G = 0 \Rightarrow I_{R1} = I_{R2} = I, \quad -V_{SS} + I(R_1 + R_2) - V_{DD} = 0 \Rightarrow$$

$$I = (V_{SS} + V_{DD}) / (R_1 + R_2) = 0,02 \text{ mA}$$

$$V_G = V_{SS} - IR_1 = 1 \text{ V}, \quad V_S = I_D R_S + V_{SS}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S \Rightarrow V_{GS} = 1 - (I_D R_S + V_{SS})$$

$$-V_{SS} - I_D R_S - V_{DS} - I_D R_D - V_{DD} = 0$$

$$\Rightarrow V_{DS} = -V_{DD} - V_{SS} - I_D (R_S + R_D)$$

$$I_D = -\beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow I_D = -\beta/2 (1 - I_D R_S - V_{SS} - V_T)^2 \Rightarrow$$

$$R_S^2 I_D^2 + 2[(V_{SS} - V_T - 1)R_S + 1/\beta] I_D + (V_{SS} + V_T - 1)^2 = 0$$

$$\Rightarrow 9I_D^2 + 10,25I_D + 2,25 = 0$$

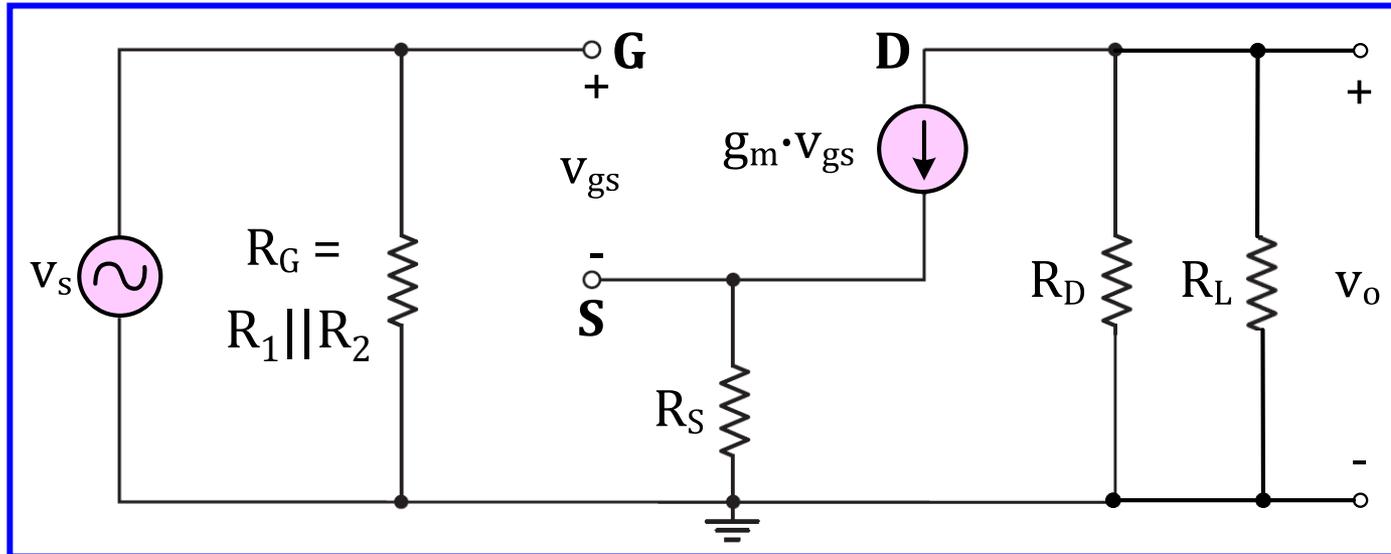
$$\text{Λύσεις εξίσωσης: } I_D = -0,3 \text{ mA}, -0,84 \text{ mA.}$$

$$I_D = -0,3 \text{ mA: } V_{DS} = -2,1 \text{ V}, V_{GS} = -1,1 \text{ V} \Rightarrow V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

$$I_D = 0,84 \text{ mA: } V_{GS} > 0 \text{ το pMOS δεν άγει και θα έπρεπε } I_D = 0$$

$$Q(V_{DS}, I_D) = (-2,1 \text{ V}, -0,3 \text{ mA})$$

Άσκηση 8η



$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 980 \mu\text{S}$$

$$R'_L = R_D || R_L = 9 \text{ k}\Omega$$

$$v_o = -g_m v_{gs} R'_L$$

$$v_s = v_{gs} + g_m v_{gs} R_S$$

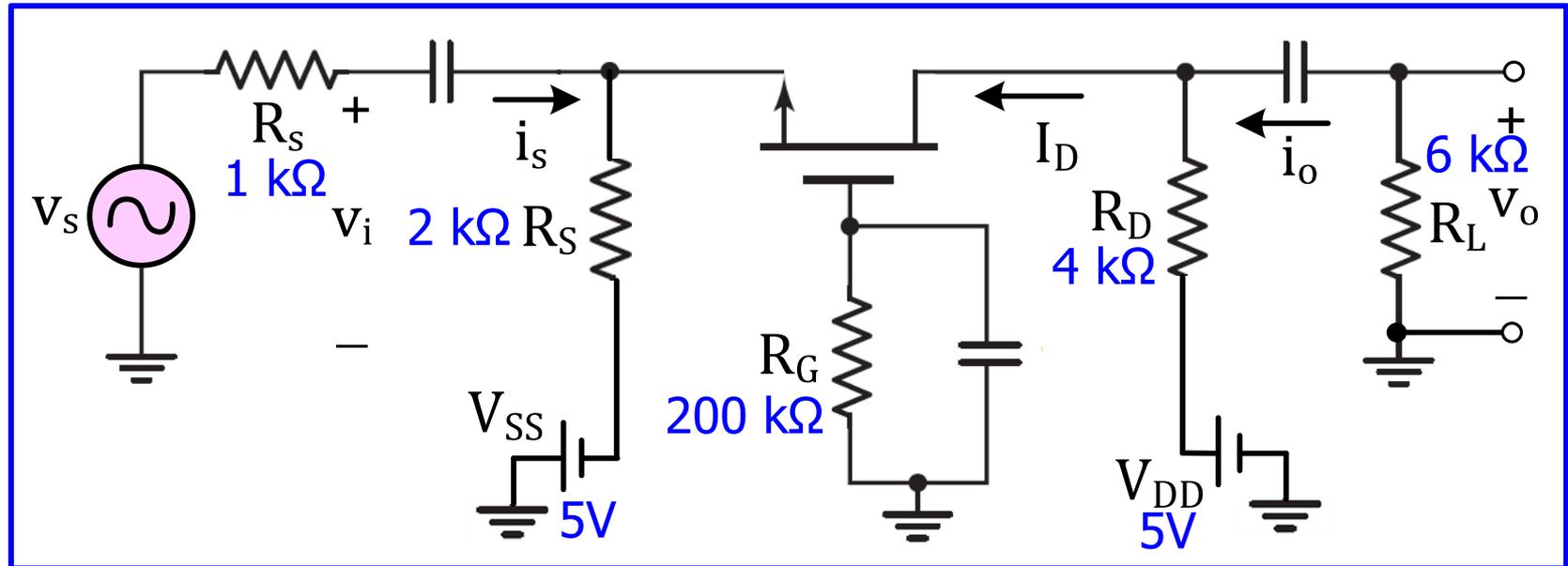
$$A_{vs} = v_o / v_s \Rightarrow$$

$$A_{vs} = -g_m R'_L / (1 + g_m R_S) \Rightarrow$$

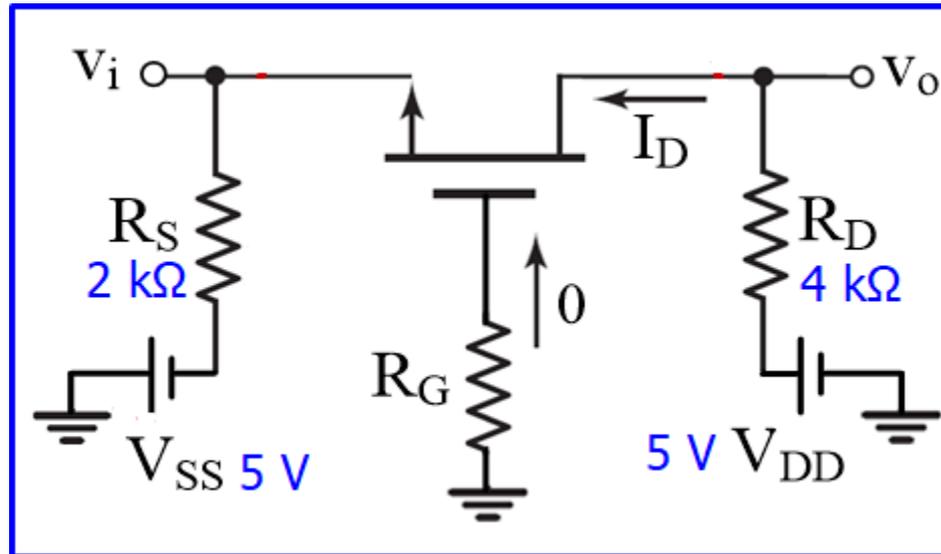
$$A_{vs} = -2,24$$

Άσκηση 9η

Για τον ενισχυτή κοινής πύλης του παρακάτω σχήματος, θα προσδιορίσουμε το σημείο λειτουργίας του nMOS, την αντίσταση εισόδου R_i , την ενίσχυση τάσης A_{v_s} και την ενίσχυση ρεύματος A_{i_L} . Για το τρανζίστορ nMOS δίνονται: $\beta = 2 \text{ mA/V}^2$, $V_T = 1 \text{ V}$.



Άσκηση 9η



$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - (I_D R_S - V_{SS}) \Rightarrow V_{GS} = V_{SS} - I_D R_S$$

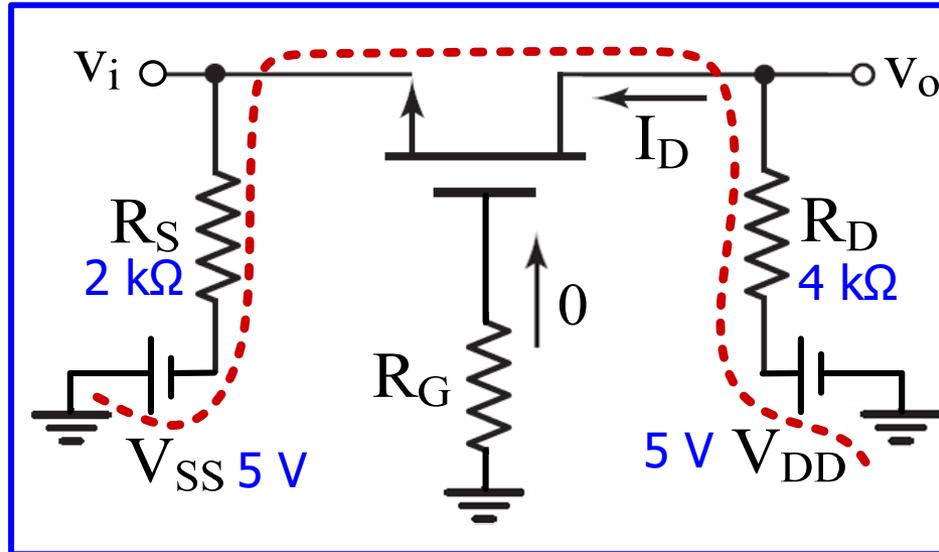
Υποθέτουμε ότι το nMOS λειτουργεί στην περιοχή κόρου:

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow I_D = \beta/2 (V_{SS} - I_D R_S - V_T)^2 \Rightarrow$$

$$R_S^2 I_D^2 - 2[(V_{SS} - V_T)R_S + 1/\beta]I_D + (V_{SS} - V_T)^2 = 0 \Rightarrow 4I_D^2 - 21I_D + 16 = 0$$

Λύσεις εξίσωσης β' βαθμού: $I_D = 0,92\text{ mA}, 4,32\text{ mA}$.

Άσκηση 9η



$$I_D = 4,32 \text{ mA} \Rightarrow V_{GS} = V_{SS} - I_D R_S = -3,64 \text{ V} \Rightarrow V_{GS} < 0$$

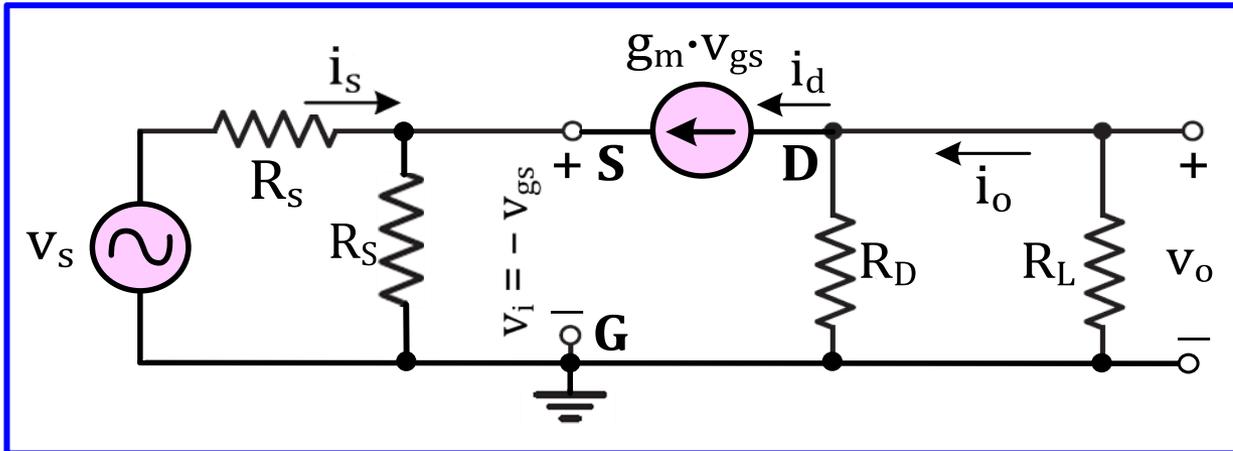
(το nMOS σε αποκοπή και θα έπρεπε $I_D = 0$)

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} + I_D R_S - V_{SS} = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_{DD} + V_{SS} - I_D (R_D + R_S)$$

$$I_D = 0,92 \text{ mA} \Rightarrow V_{DS} = 4,48 \text{ V}, \quad Q(V_{DS}, I_D) = (4,48 \text{ V}, 0,92 \text{ mA}).$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T, \quad 4,48 \text{ V} > (5 - 0,92 \cdot 2) - 1 = 2,16 \text{ V} \Rightarrow \text{nMOS περιοχή κόρου}$$

Άσκηση 9η



$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 1918 \mu\text{S}$$

$$R'_L = R_D \parallel R_L = 2,4 \text{ k}\Omega$$

$$R_i = v_i / i_s = -v_{gs} / i_s \Rightarrow R_i = R_S / (1 + g_m R_S) \Rightarrow R_i = 0,414 \text{ k}\Omega$$

$$v_i = [R_i / (R_i + R_S)] v_s \Rightarrow v_{gs} = -[R_i / (R_i + R_S)] v_s$$

$$v_o = -g_m v_{gs} R'_L \Rightarrow v_o = g_m R'_L [R_i / (R_i + R_S)] v_s$$

$$A_{vs} = v_o / v_s = g_m R'_L [R_i / (R_i + R_S)] \Rightarrow A_{vs} = 1,35$$

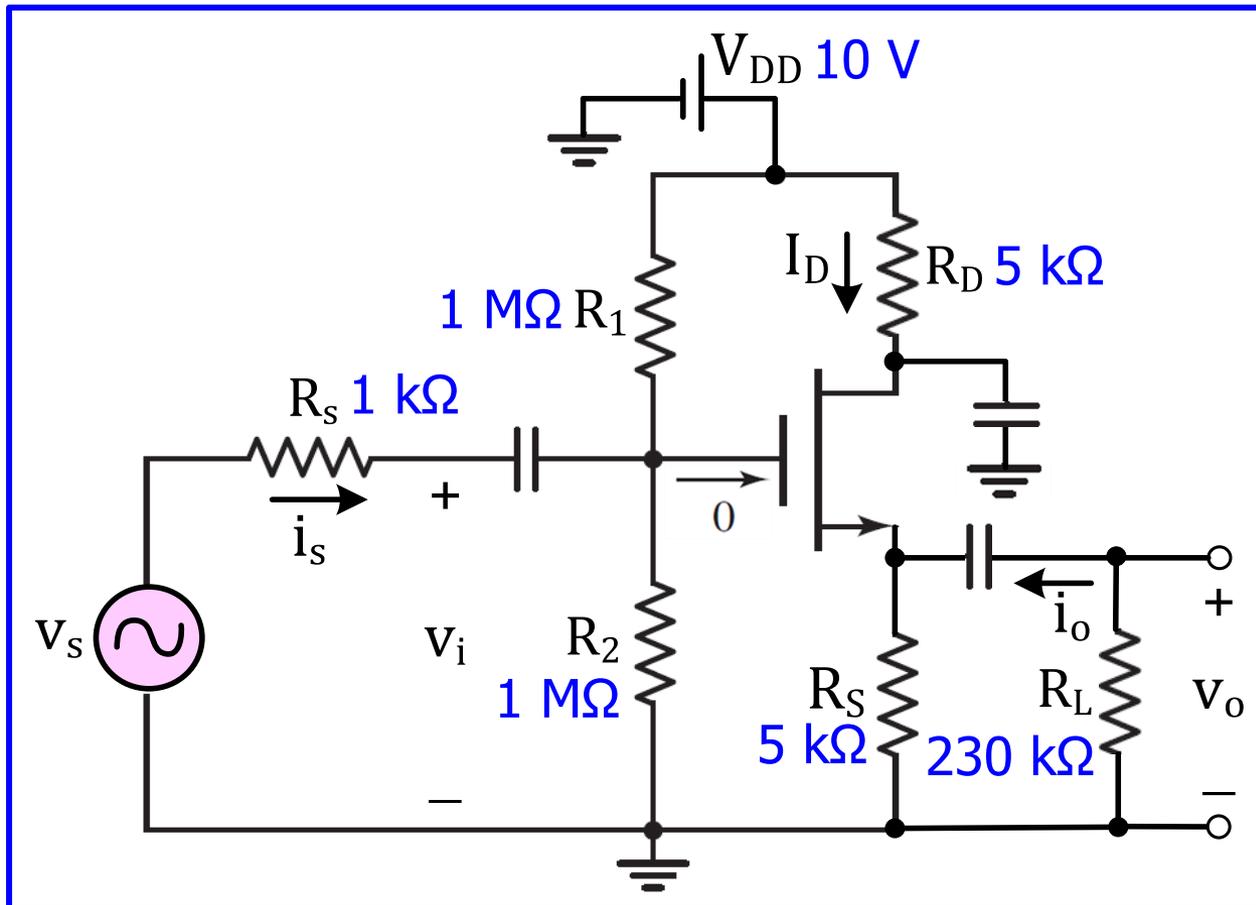
$$v_{gs} = -(i_s + i_d) R_S = -(i_s + g_m v_{gs}) R_S \Rightarrow v_{gs} = -i_s R_S / (1 + g_m R_S)$$

$$i_o = \frac{R_D}{R_D + R_L} g_m v_{gs} \Rightarrow A_{iL} = -\frac{R_D}{R_D + R_L} \frac{g_m R_S}{(1 + g_m R_S)} \Rightarrow A_{iL} = -0,32$$

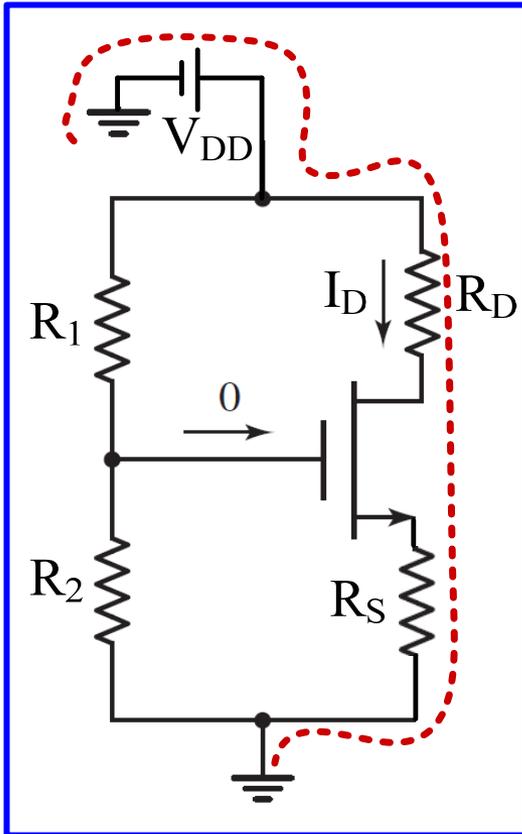
Ο ενισχυτής CG δεν παρέχει ενίσχυση ρεύματος

Άσκηση 10η

Για τον ενισχυτή κοινής υποδοχής του σχήματος, θα προσδιορίσουμε το σημείο λειτουργίας του nMOS, την ενίσχυση τάσης A_{v_s} , την ενίσχυση ρεύματος A_{i_L} και τις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου. Για το nMOS δίνονται: $\beta = 1,2 \text{ mA/V}^2$ και $V_T = 1 \text{ V}$.



Άσκηση 10η



$$I_G = 0 \Rightarrow V_G = [R_2 / (R_1 + R_2)]V_{DD} \Rightarrow V_G = 5 \text{ V}$$

$$V_S = I_D R_S, \quad V_{GS} = V_G - V_S \Rightarrow V_{GS} = 5 - I_D R_S$$

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} + I_D R_S = 0$$

$$\Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow I_D = \beta/2 (5 - I_D R_S - V_T)^2 \Rightarrow$$

$$R_S^2 I_D^2 - 2[(5 - V_T)R_S + 1/\beta]I_D + (5 - V_T)^2 = 0$$

$$\Rightarrow 25I_D^2 - 40,16I_D + 16 = 0$$

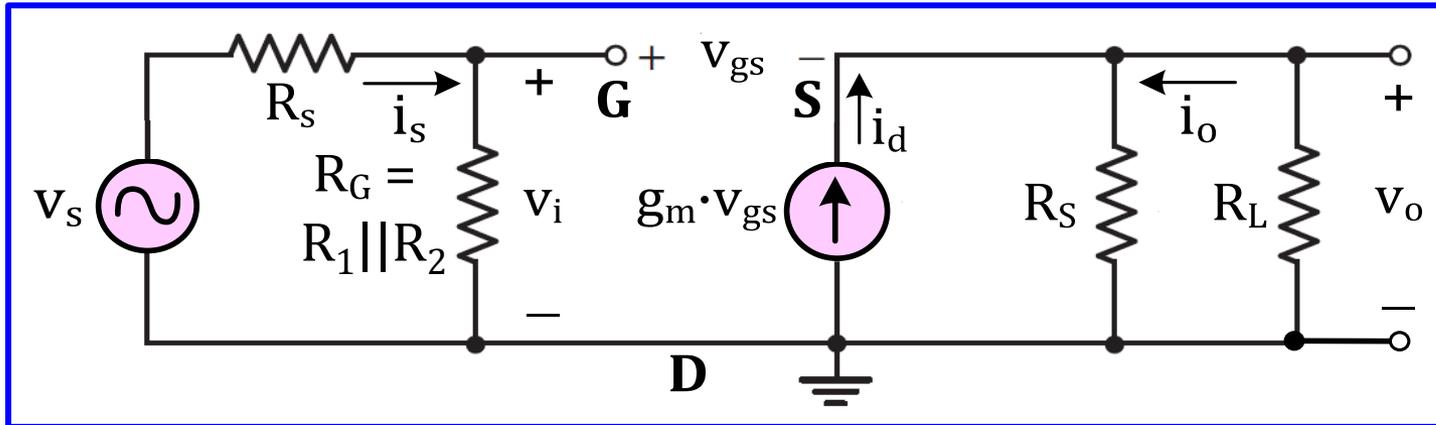
Λύσεις εξίσωσης: $I_D = 0,6 \text{ mA}, 1,06 \text{ mA}$.

$$I_D = 0,6 \text{ mA}: V_{DS} = 4 \text{ V}, V_{GS} = 2 \text{ V} \Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

$$I_D = 1,06 \text{ mA}: V_{GS} < 0 \text{ το nMOS δεν άγει και θα έπρεπε } I_D = 0$$

$$Q(V_{DS}, I_D) = (4 \text{ V}, 0,6 \text{ mA})$$

Άσκηση 10η



$$R_G = R_1 \parallel R_2 = 500 \text{ k}\Omega$$

$$R'_L = R_S \parallel R_L = 4,9 \text{ k}\Omega$$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 1,2 \text{ mS}$$

$$v_i = v_{gs} + v_o \Rightarrow v_{gs} = v_i - v_o$$

$$v_o = g_m v_{gs} R'_L = g_m (v_i - v_o) R'_L \Rightarrow v_o = g_m R'_L v_i / (1 + g_m R'_L)$$

$$v_i = \frac{R_G}{R_s + R_G} v_s \quad v_o = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \frac{R_G}{R_s + R_G} v_s$$

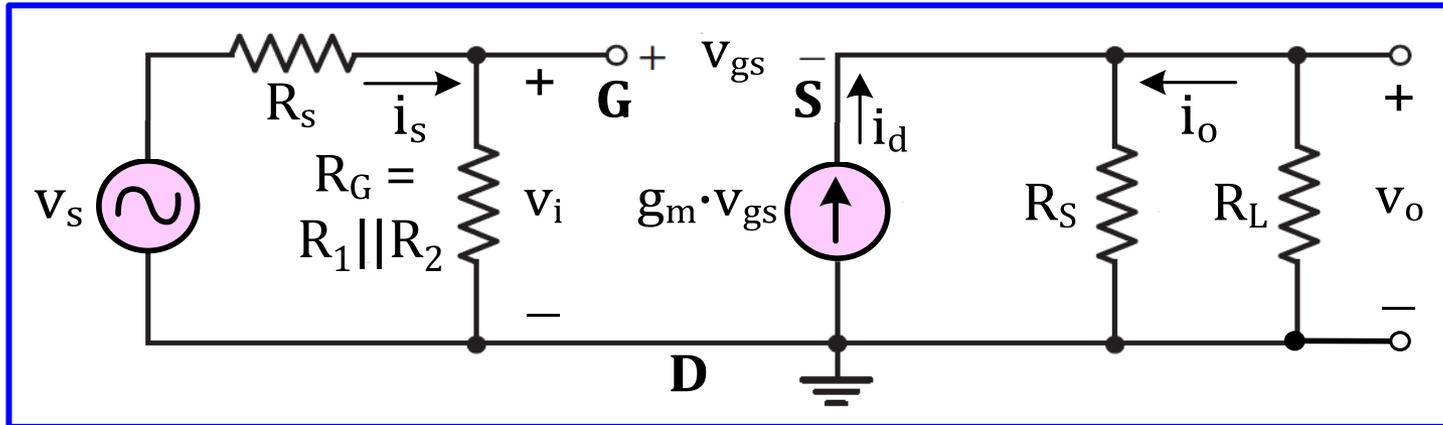
$$A_{vs} = v_o / v_s = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \frac{R_G}{R_s + R_G} \Rightarrow A_{vs} = 0,853 < 1$$

$$R_i = v_i / i_s = R_G = 1 \text{ M}\Omega$$

$$R_o = v_o / i_o = R_S \parallel (1/g_m) = 0,71 \text{ k}\Omega$$

($v_i = 0, R_L = \infty$)

Άσκηση 10η



$$i_s = v_i / R_G = (v_{gs} + v_o) / R_G = (v_{gs} + g_m v_{gs} R'_L) / R_G \Rightarrow$$

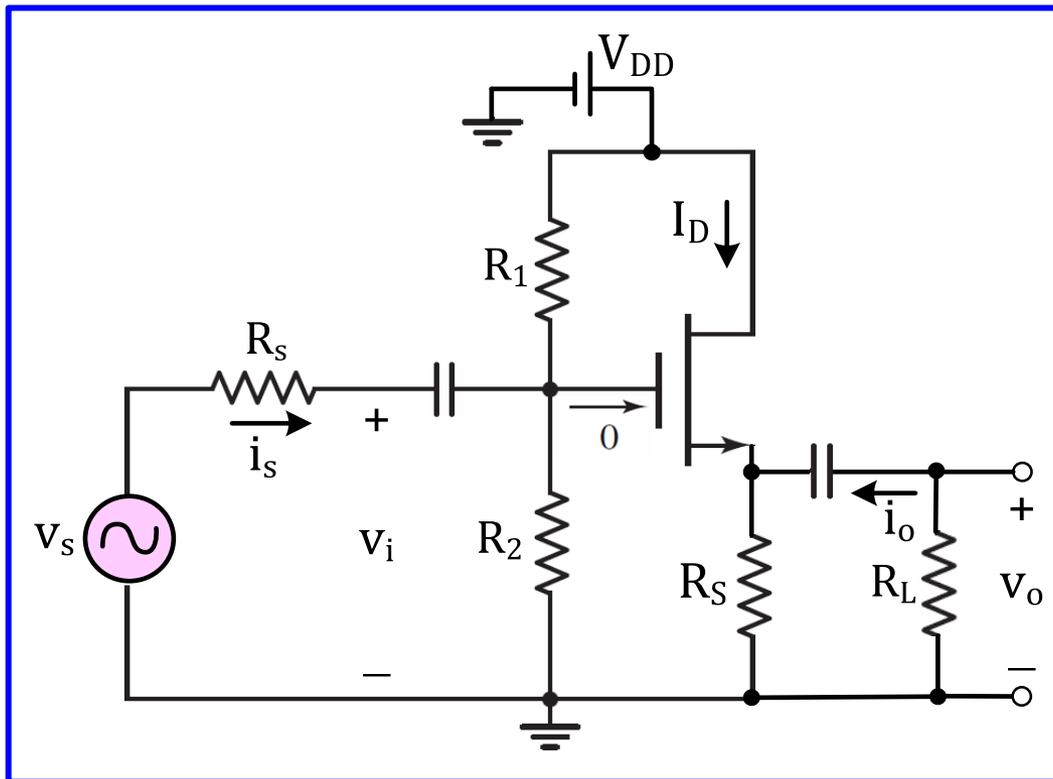
$$v_{gs} = R_G i_s / (1 + g_m R'_L)$$

$$i_o = -g_m v_{gs} \frac{R_S}{R_S + R_L} \Rightarrow i_o = -g_m \frac{R_G i_s}{1 + g_m R'_L} \frac{R_S}{R_S + R_L}$$

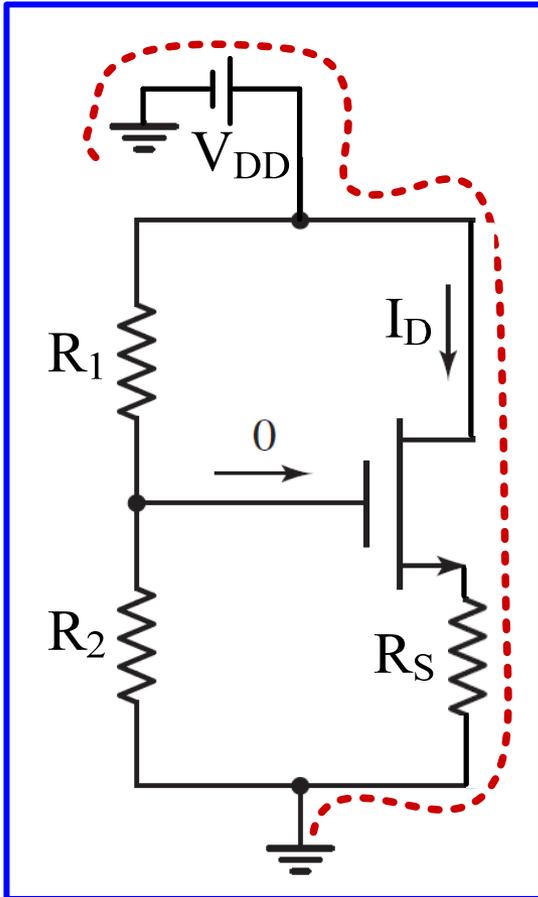
$$A_{iL} = i_o / i_s = -\frac{g_m R_G}{1 + g_m R'_L} \frac{R_S}{R_S + R_L} \Rightarrow A_{iL} = -1,85$$

Άσκηση 11η

Για τον ενισχυτή κοινής υποδοχής του σχήματος δίνονται: $V_{DD} = 3\text{ V}$, αντίσταση εισόδου (R_i) = $300\text{ k}\Omega$, $R_L = 800\text{ k}\Omega$, $R_S = 1\text{ k}\Omega$. Θα υπολογίσουμε τα στοιχεία του ενισχυτή (R_1 , R_2 , R_S), έτσι ώστε το σημείο λειτουργίας του nMOS να είναι $Q(V_{DS}, I_D) = (1,5\text{ V}, 0,25\text{ mA})$. Κατόπιν, θα υπολογίσουμε την ενίσχυση τάσης A_{v_s} και την αντίσταση εξόδου του ενισχυτή. Για το nMOS δίνονται: $\beta = 1\text{ mA/V}^2$, $V_T = 0,4\text{ V}$.



Άσκηση 11η



$$-V_{DD} + V_{DS} + I_D R_S = 0$$

$$\Rightarrow R_S = (V_{DD} - V_{DS}) / I_D \Rightarrow R_S = 6 \text{ k}\Omega$$

$$I_D = \beta/2 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_D}{\beta}} + V_T = 1,1 \text{ V}$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T \Rightarrow \text{περιοχή κόρου}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S \Rightarrow V_G = V_{GS} + V_S = V_{GS} + I_D R_S = 2,6 \text{ V}$$

$$I_G = 0 \Rightarrow V_G = [R_2 / (R_1 + R_2)] V_{DD} \Rightarrow$$

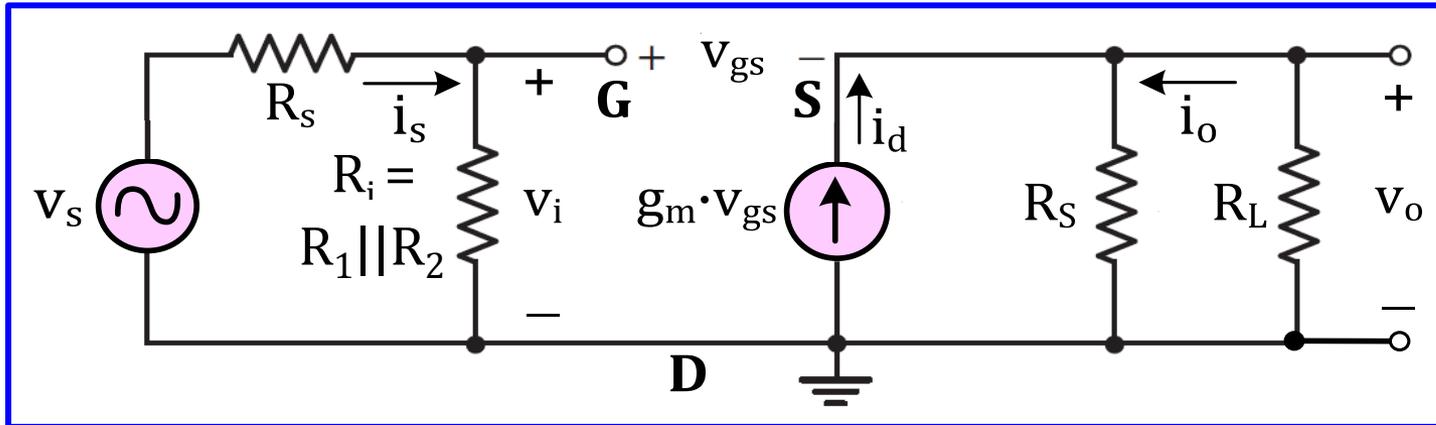
$$R_2 / (R_1 + R_2) = V_G / V_{DD} = 0,866$$

$$R_i = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) \Rightarrow R_i = R_1 [R_2 / (R_1 + R_2)] \Rightarrow$$

$$R_1 = R_i / 0,866 \Rightarrow R_1 = 346,4 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 / (R_1 + R_2) = 0,866 \Rightarrow R_2 = 2238,7 \text{ k}\Omega$$

Άσκηση 11η



$$R'_L = R_S \parallel R_L = 5,95 \text{ k}\Omega$$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 707 \text{ }\mu\text{S}$$

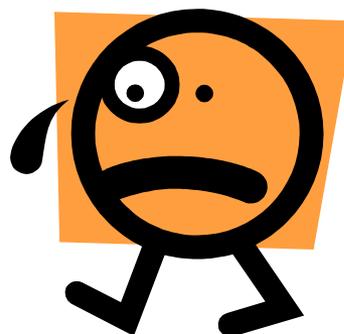
$$v_i = v_{gs} + v_o \Rightarrow v_{gs} = v_i - v_o$$

$$v_o = g_m v_{gs} R'_L = g_m (v_i - v_o) R'_L \Rightarrow v_o = g_m R'_L v_i / (1 + g_m R'_L)$$

$$v_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s \quad v_o = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s$$

$$A_{vs} = v_o / v_s = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \frac{R_i}{R_s + R_i} \Rightarrow A_{vs} = 0,805 < 1$$

$$R_o = v_o / i_o = R_S \parallel (1/g_m) = 1,14 \text{ k}\Omega \quad (v_i = 0, R_L = \infty)$$



Τέλος 3ης ενότητας